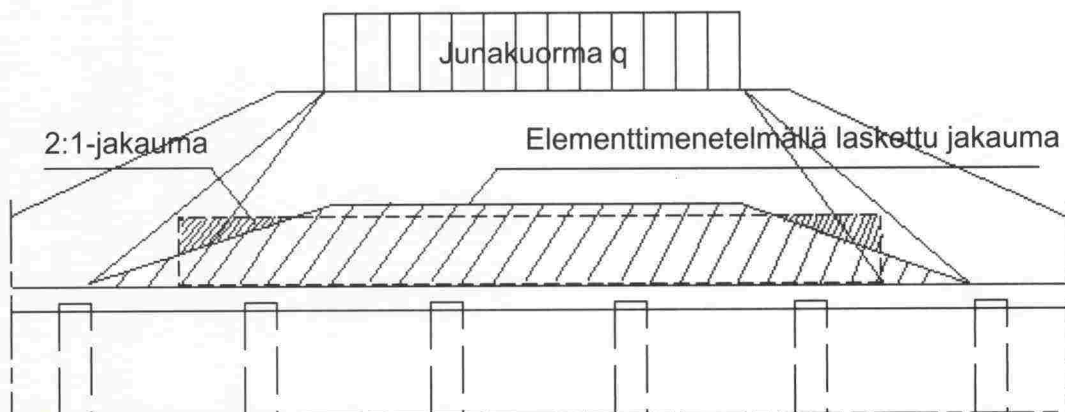


Jukka Kujala

## Paalulaattarakenteiden suunnittelu

Tiehallinnon selvityksiä 25/2005



Jukka Kujala

# **Paalulaattarakenteiden suunnittelu**

**Tiehallinnon selvityksiä 25/2005**

**Tiehallinto**

Helsinki 2005



ISSN 1457-9871  
ISBN 951-803-509-1  
TIEH 3200937

Oy Edita Prima Oy  
Helsinki 2005

Verkkojulkaisu saatavana osoitteesta:  
<http://alk.tiehallinto.fi/julk2.htm>

ISSN 1459-1553  
ISBN 951-803-510-5  
TIEH 3200937-v



**Tiehallinto**  
Asiantuntijapalvelut  
Opastinsilta 12 A  
PL 33  
00521 HELSINKI  
Puhelinvaihte 0204 2211

**Asiasanat:** Penkereen perustaminen, Paalulaatta, Betonipaalut, Laattarakenteet

## TIIVISTELMÄ

Tässä tutkimuksessa on tarkasteltu paalulaattarakenteiden käyttöalueita sekä niiden toimintaa paalulaattarakenteiden suunnitteluperiaatteiden yhtenäistämiseksi teiden, ratojen, katujen ja pihojen osalta. Vaikka liikennekuormitukset eri käyttökohteissa ovatkin erilaiset, voidaan tämän yhtäläistä kuormitusjakaumaa käytettäessä katsoa olevan vain suunnitteluperiaatteisiin vaikuttamaton lähtötieto.

Paalulaattarakenteen käyttöalueita ovat erityisesti pehmeiköt, joissa vaihtoehtoisilla perustamismenetelmillä ei voida saavuttaa teknisesti toimivaa ratkaisua. Hyvin pehmeillä pohjamailla, missä paalulaatan valualustan painuma tai mahdollinen negatiivinen vaippahankaus voivat heikentää rakenteen toimivuutta, on toimivan paalulaattarakenteen suunnittelun perustuttava pohjasuhteet tarkasti selvittäviin pohjatutkimuksiin.

Paalulaattarakenteiden toimintaa on tarkasteltu sekä geoteknisesti että rakenteellisesti niin paalujen kuin niihin tukeutuvan paalulaatankin suhteen. Paalulaatan varaan rakennetun penkereen osalta on tarkasteltu tämän toimintaa ja merkitystä paalulaattarakenteelle aiheutuviin kuormituksiin. Lisäksi on tarkasteltu paalutustyön ja lähialueilla tehtävien toimenpiteiden kuten kaivujen tai läjitysten merkitystä rakenteen toimivuuteen.

Lähtökohtana paalulaattarakenteiden suunnittelussa voidaan pitää paalulaattarakenteen 100 vuoden käyttöikää. Suomessa paalulaattarakenteiden historian alkuaikojen varmoista suunnitteluperiaatteista on ajan myötä tultu tilanteeseen, jossa paalulaatat eivät aina täytä betonirakenteille määrättyjä vaatimuksia. Etenkin ohuet sienilaatat voidaan katsoa herkeksi penger- ja liikennekuormien niille aiheuttamille jännityksille.

Nykyisin sekä Tiehallinnolla että Ratahallintokeskuksella on melko uudet paalulaattoja käsittelevät suunnitteluohjeet. Kuitenkin tilanne, jossa Suomen Rakentamismääräyskokoelman betonirakenteita koskevat määräykset ovat tiukentuneet, kyseenalaistaa nykyisten suunnitteluperiaatteiden toimivuuden. Tällöin on tarpeellista tarkastella nykyisten suunnitteluperiaatteiden toimivuutta tutkimuksessa esitettyjen esimerkkitapausten osalta ja ehdottaa yhtenäisiä suunnitteluperiaatteita siten, että paalulaattarakenteen 100 vuoden elinkaari olisi turvattu.

Tarkasteluissa havaittiin, että esimerkkitapaukset, jotka oli suunniteltu ja rakennettu voimassa olevien suunnitteluohjeiden mukaan täyttivät rakenteelle asetetut voimassa olleiden määräysten asettamat vaatimukset niin geoteknisesti kuin rakenteellisestikin. Kohteissa, joissa suunnitelmat oli tehty vanhentuneiden suunnitteluohjeiden mukaisesti tai joissa laatta oli suunniteltu liian ohueksi, laatan sallitun halkeamaleveyden katsottiin ylittyvän. Tällöin rakenteen elinkaari voi jäädä 100 vuotta lyhyemmäksi. Vaurioituneen esimerkkitapausten osalta arvioitiin sekä suunnittelussa että rakentamisessa tapahtuneiden virheiden johtaneen rakenteen romahtamiseen. Jos esimerkkitapausten toimivuutta arvioidaan vuonna 2005 voimaan astuneiden Suomen Rakentamismääräyskokoelman betonirakenteita koskevien määräysten salliman halkeamaleveyden perusteella, ei yhdenkään esimerkkikohteista voida katsoa täyttävän rakenteen 100 vuoden käyttöikävaatimusta.



**Keywords:** Embankment foundations, Pile plate, Concrete piles, Plate structures

## SUMMARY

The purpose of this research is to determine right utilization for pile plate structures and also to study their basic behaviour. The aim is to recommend similar design code for pile plate structures in roads, railroads, streets and yards. Traffic loads do not influence design codes as long as the distribution of loads is similar.

Pile plate structure is a foundation method usually used on soft soil areas where alternative methods are technically not sufficient. Settlements of concreting beds and negative friction of piles are common problems on very soft soils. These problems shall be solved by accurate design based on adequate soil investigation.

Pile plate structures formed of plate which is supported by piles are studied both structurally and geotechnically. Embankment that is supported by plate is studied by its behaviour and also by its influence on pile plate structure. It is also studied how pile driving and other actions such as digging or banking close to pile field effect on structures functioning.

Basis of pile plate structures design is 100 years working time. In Finland history of pile plate structures started from earlier times safe design and has moved towards recent times more economical adjusted designing. In some occasions pile plate structures are designed so that they no longer meet structural requirements set for concrete structures. Especially thin mushroom plates are sensitive to loads caused by embankment and traffic.

Both Finnish Road Administration and Finnish Railroad Administration have reasonably new design instructions for pile plate structures. However chances made in Finnish Building Regulations, Concrete Structures, contradict existing structures 100 years working time. In order to recommend similar design codes and to ensure 100 years working time of pile plate structures analyses must be made to determine how existing design instructions suit for example cases.

In studies following observations were made: Example cases were designed and constructed to meet both structural and geotechnical requirements. Cases that were designed following out of date design instruction or excessively thin plates have risk of exceeding permitted crack widths of plates. In damaged example cases errors concerning both design and construction are considered to cause total collapse of structures. If calculated crack widths of example plates are compared to instruction presented in existing Finnish Building Regulations none of the cases meet the requirements set to structures of 100 years working time.

## ESIPUHE

Tämä tutkimus on tehty TTY:ssä. Tutkimuksen on tehnyt Jukka Kujala. Tutkimuksessa on tarkasteltu paalulaattarakenteiden käyttöalueita sekä niiden toimintaa paalulaattarakenteiden suunnitteluperiaatteiden yhtenäistämiseksi teiden, ratojen, katujen ja pihojen osalta. Voimassa oleviin määräyksiin ja pohjasuhteet tarkasti selvittäviin pohjatutkimuksiin perustuvilla suunnitelmilla ja suunnitelmia noudattavalla rakennustyöllä varmistetaan paalulaatan toimivuus sekä rakenteellisesti että geoteknisesti.

Tutkimuksen ovat rahoittaneet Tiehallinto, Oy VR-Rata Ab, Helsingin kaupungin geotekninen osasto, Tampereen kaupungin yhdyskuntapalvelut sekä insinööritoimisto Geotesti Oy. Työtä ovat ohjanneet Pentti Salo, Esko Palmu ja Matti Piispanen Tiehallinnosta, Mauri Kulman, Ilkka Sinisalo ja Jouko Suomalainen Oy VR-Rata Ab:sta, Osmo Korhonen Helsingin kaupungin geotekniseltä osastolta, Kari Hietala Tampereen kaupungin yhdyskuntapalveluista, Markku Valtonen insinööritoimisto Geotesti Oy:stä ja Jorma Hartikainen Tampereen teknillisestä yliopistosta. Lisäksi asiantuntijoina ovat toimineet Petter Sandin Uudenmaan tiepiiristä sekä Hannu Jokiniemi Ruukki Oy:stä.

Helsingissä, toukokuussa 2005

Tiehallinto, Asiantuntijapalvelut

## SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	10
1.1 Tausta	10
1.2 Tavoite	11
1.3 Työmenetelmät ja tutkimuksien tekeminen	11
2. PENKEREEN PERUSTAMINEN	13
2.1 Paalulaattarakenteet	13
2.2 Vaihtoehtoiset rakenteet	16
2.2.1 Vaihtoehtoisen rakenteen valinta	16
2.2.2 Paaluhatturakenteet	16
2.2.3 Muut vaihtoehtoiset rakenteet	18
2.3 Paalulaattarakenteen liittyminen muihin rakenteisiin	26
2.3.1 Liittyminen painumattomaan rakenteeseen	26
2.3.2 Liittyminen painuvaan rakenteeseen	31
2.4 Varautuminen paalulaattarakenteen leventämiseen	32
3. KÄYTTÖALUEET JA KUORMAT	34
3.1 Rautatiet	34
3.1.2 Nopea liikenne	45
3.1.3 Hidas liikenne	46
3.2 Tiet	46
3.2.1 Käyttöalueiden määräytyminen	46
3.2.2 Moottori- ja päätiet	54
3.2.3 Muut tiet	55
3.3 Kadut	56
3.3.1 Käyttöalueiden määräytyminen	56
3.3.2 Pääkadut	57
3.3.3 Muut kadut	57
3.4 Pihat	58
4. PAALULAATAN SUUNNITTELU	60
4.1 Laattatyypit	60
4.1.1 Laattatypin valinta	60
4.1.2 Tasapaksu laatta	60
4.1.3 Sienilaatta	60
4.1.4 Palkkilaatta	61
4.2 Geotekninen suunnittelu	62
4.2.1 Laatan mittojen valinta alueellisen ja penkereen stabiliteetin mukaan	62
4.2.2 Korkeustason ja kaltevuuden suunnittelu	67



4.2.3	Valualustan suunnittelu	67
4.2.4	Routasuojaus	68
4.3	Rakenteellinen mitoitus	69
4.3.1	Yleistä	69
4.3.2	Rasitusluokat	70
4.3.3	Materiaalivaatimukset ja sallitut mittapoikkeamat	70
4.3.4	Läpileikkautuminen	70
4.3.5	Taivutus	72
4.3.6	Halkeilu	74
5.	PAALUPERUSTUKSEN SUUNNITTELU	77
5.1	Noudatettavat ohjeet	77
5.2	Pohjatutkimukset	77
5.3	Paalutyypit	78
5.3.1	Betonipaalut	78
5.3.2	Teräsputkipaalut	79
5.4	Paalujen kuormat	80
5.4.1	Kuormat	80
5.4.2	Pystykuormat	81
5.4.3	Vaaka- ja momenttikuormitukset	81
5.4.4	Sivukuormitus	82
5.4.5	Negatiivinen vaippahankaus	82
5.5	Paalujen ja paaluryhmien geotekninen mitoitus	86
5.5.1	Tukipaalut	86
5.5.2	Kitkapaalut	87
5.5.3	Sivusiirtymät ja sivukapasiteetti	87
5.6	Paalujen rakenteellinen mitoitus	92
5.6.1	Rakenteelliset määräykset ja ohjeet	92
5.6.2	Epäkeskisyys	93
5.6.3	Käyryys	93
5.6.4	Nurjahdus	93
5.6.5	Taivutus ja sallittu halkeamaleveys	95
5.6.6	Puristus	95
5.7	Paaluperustuksen rakenteellinen suunnittelu	95
5.7.1	Yleistä	95
5.7.2	Tukipaaluperustuksen alustava suunnittelu	96
5.7.3	Paalun sivukapasiteetin huomioiminen numeerisella menetelmällä	98
5.8	Paalutustyö	100
5.8.1	Yleistä	100
5.8.2	Paalutuksen vaikutus jo lyötyihin paaluihin ja ympäristöön	100

5.8.3	Vaikeat pohjasuhteet	103
5.8.4	Lyhyet paalut	104
5.8.5	Lyönnin lopettaminen	104
5.9	Sallitut sijaintipoikkeamat	104
6.	ESIMERKKITAPAUKSET	106
6.1	Tarkastelujen suorittaminen	106
6.2	Kehä III (Kt 50) parantaminen välillä Lentoasemantie – Tikkurila, Suutarilan eritasoliittymä	106
6.2.1	Kohteen kuvaus	106
6.2.2	Rakenne	108
6.2.3	Rakenteen toimivuuden arviointi	109
6.3	E18 Paimio – Muurla	110
6.3.1	Kohteen kuvaus	110
6.3.2	Rakenne	110
6.3.3	Rakenteen toimivuuden arviointi	111
6.4	Valtatien 7 (E18) parantaminen moottoritieksi välillä Porvoo – Koskenkylä	113
6.4.1	Kohteen kuvaus	113
6.4.2	Rakenne	115
6.4.3	Rakenteen toimivuuden arviointi	116
6.5	Vt 4 (E75) parantaminen moottoritieksi välillä Järvenpää – Lahti	117
6.5.1	Kohteen kuvaus	117
6.5.2	Rakenne	118
6.5.3	Rakenteen toimivuuden arviointi	119
6.6.	Multasilta	120
6.6.1	Kohteen kuvaus	120
6.6.2	Rakenne	121
6.6.3	Syyt rakenteen vaurioitumiseen	122
7.	KORJAUSSUUNNITTELU	124
7.1	Yleistä	124
7.2	Vaurion ilmentyminen	124
7.3	Korjausmenetelmät ja niiden vaikutus rakenteen elinkaareen	125
7.3.1	Epäsuorat korjausmenetelmät	125
7.3.2	Suorat korjausmenetelmät	126
8.	EHDOTUS YHTENÄISISTÄ SUUNNITTELUPERIAATTEISTA	130
8.1	Käyttöalueet	130
8.2	Kuormitukset	131
8.3	Paaluperustuksen suunnittelu	132
8.4	Paalulaatan suunnittelu	133
8.4.1	Geotekninen suunnittelu	133

---

8.4.2 Rakenteellinen suunnittelu	134
9. JOHTOPÄÄTÖKSET	139
9.1 Paalulaattarakenne	139
9.2 Käyttöalueiden ongelmallisuus	140
9.3 Yhtäläisten suunnitteluperiaatteiden edut	140
10. KIRJALLISUUSLUETTELO	142
11. LIITTEET	143

---



# 1. JOHDANTO

## 1.1 Tausta

Pengerpaalutus, joka on Pohjois-Euroopassa yli 50 vuotta vanha pehmeiköille rakennettavien penkereiden perustamismenetelmä, alkoi paalumateriaalin osalta puun käytöllä. Aluksi penkereet rakennettiin joko suoraan puupaalujen varaan, tai esimerkiksi erilaisten hirsiarinoiden välityksellä. Paaluhatturakenteen käyttö aloitettiin 1960-luvun alussa Ruotsissa, ja pian sen käyttö levisi myös Suomeen. Puun käyttö pengerpaalutuksen paalumateriaalina pysyi yleisenä aina 1980-luvulle saakka. Teräsbetonipaalujen käyttö alkoi Suomessa 1960-luvulla korkealuokkaisten rakenteiden osalta. Ajan kuluessa betonipaalujen käyttö yleistyi ja 1980-luvulla ne saavuttivat nykyisen asemansa käytetyimpänä paalutyypinä.

Paaluhatturakenteen toimivuus etenkin vaikeasti paalutettavissa pohjasuhteissa sekä dynaamisten, raskaiden liikenne kuormien alaisena koettiin liian epävarmaksi. Pengerrakenteen holvaantumisen puute, joka johti pengermaateriaalin valumiseen paaluhattujen välistä pohjamaahan, teki paalulaattarakenteesta perustamismenetelmänä paaluhatturakennetta toimivamman. Myös tarve hyödyntää teräsbetonipaalujen kapasiteettia paaluhatturakennetta paremmalla tavalla edistää paalulaattarakenteen käyttöä. Paaluhatturakennetta on kuitenkin etenkin tie- ja katurakenteissa käytetty pitkään paalulaattarakenteen hyötynäkökohtien tunnustamisen jälkeenkin sen paalulaattarakennetta yksinkertaisemman mitoituksen ja edullisemman toteutuksen vuoksi.

Paalulaattarakenteilla ei vielä niiden yleisen käyttöönoton myötä ollut varsinaisia suunnitteluohjeita. Suunnitteluohjeiden puuttuessa paalulaattarakenteet vastasivat toimintatavaltaan lähinnä sillan kansilaattaa. Näistä erittäin varmoista suunnitelmista on ajan kuluessa ja varmuustasosta tingittäessä tultu tilanteeseen, jossa rakenne ei enää kaikissa tapauksissa palvele käyttötarkoitustaan. Paalulaattojen alimitoitus on näin ollen eräänlainen ylilyönti, matkalla rakenteiden taloudelliseen optimointiin. Jossain tuolla välillä on se kultainen keskitie, jota tälläkin diplomityöllä pyritään etsimään.

Nykyisin Tiehallinnolla on varsin uudet suunnitteluohjeet: Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnitteluohje. Samoin on Ratahallintokeskuksella: RMYTL Osa 3 Perustamis- ja vahvistamistyöt. Lisäksi Ratahallintokeskuksella on kaksi julkaisua, jotka sisältävät tyyppilaattojen rakennesuunnittelun /?/, /?/. Kun kaupungit pitkälti seuraavat Tiehallinnon suunnitteluperiaatteita, ongelmia ei pitäisi olla. Kuitenkin monissa kohteissa keskustellaan tai riidellään suunnitteluperiaatteista, mikä pahimmillaan on johtanut ylimääräisiin kustannuksiin paalulaattarakenteiden elinkaaren jäädessä tavoitetta lyhyemmäksi.

Näin ollen on tärkeää, että suunnitteluperiaatteet ovat sekä geoteknisesti että rakenteellisesti riskittömiä ja että ne ovat infrarakentamisen yhtenäistämiseksi ja selkiinnyttämiseksi samat rata-, tie- ja katurakenteiden osalta. Luonnollisesti liikennekuormat ovat hyvin erilaiset, mutta tämän pitäisi olla suunnitteluperiaatteisiin vaikuttamaton lähtötieto.



Myös on tärkeää selvittää peruskäsitteet, kuten esimerkiksi, mikä on paalulaattarakenne ja mikä on paaluhatturakenne. Samoin pitää selkiinnyttää näiden rakenteiden käytön rajoitukset ottaen huomioon pohjasuhteet sekä rakenne ja sen kuormitukset. Tuomalla esiin paalulaattarakenteen koko elinkaaren aikaiset tekniset vaatimukset, voidaan rakenne mitoittaa optimaalisesti sen elinkaarikustannuksia ajatellen.

Tilanteet, joissa joudutaan rakenteen osittaiseen korjaukseen tai jopa koko rakenteen uusintaan, ovat taloudellisesti kalliita sekä rakenteena että ajan menetyksinä, varsinkin jos rakenteen pitää samanaikaisesti palvella liikennettä. Tämän vuoksi onkin perusteltua panostaa suunnitelmiin ja työn laatuun elinkaarikustannuksien minimoimiseksi.

Tilaajatahon tavoite kokonaisvastuurakentamiseen infrarakenteiden osalta ohjaa urakoitsijoita kohti laadullisesti parempaa, hyvin suunniteltua rakentamista. Tällöin on tärkeää, että myös suunnitelmat palvelevat samaa päämäärää. Suunnitteluohjeiden ollessa ensikädessä suunnittelijoiden työkaluja on niiden yhdenmukaisuudelle näin entistä enemmän tarvetta.

## 1.2 Tavoite

Tutkimuksen tavoitteena on esittää yhdenmukaiset suunnitteluperiaatteet paalulaattarakenteille riippumatta niiden varaan tulevista rakenteista kuitenkin kuormitukset huomioon ottaen. Tämä voidaan toteuttaa vain perusteellisten, rakenteisiin sekä työmenetelmiin perustuvien, selvitysten valossa. Näin ollen on selvitettävä, miten pengerlaatan, mukaan luettuina paalut, pitää toimia geoteknisesti ja rakenteellisesti.

Lisäksi pitää selvittää, kuinka nykyisiä suunnitteluohjeita noudatetaan ja jos ei, niin miksi. Tällöin voidaan luotettavasti osoittaa vaurioiden syyt, jolloin vaurioituneet rakenteet analysoidaan suunnittelussa ja toteutuksessa tehtyjen virheiden osalta oikein.

## 1.3 Työmenetelmät ja tutkimuksien tekeminen

Tässä tutkimuksessa tullaan vertaamaan esimerkkikohteiden suunnitelmia ja toteutumapiirroksia suunnitteluohjeisiin. Mikäli vaurioituneissa esimerkkikohteissa on ilmentynyt suunnitelmien poikkeamista suunnitteluohjeista, rakennustyön noudattaessa suunnitelmia, on vika rakenteellisessa tai geoteknisessä alimitoituksessa. Vaurioiden ilmentyminen suunnitelmien noudattaessa suunnitteluohjeita viittaa puolestaan suunnitteluohjeen toimimattomuuteen tai laiminlyönteihin työn suorituksessa. Jos taas todetaan, että rakenteet täyttävät kantavien rakenteiden toiminnalliset vaatimukset suunnitteluohjetta alhaisemmalla varmuudella pitää harkita onko suunnitteluohjeen edellyttämä varmuustaso liian korkea. Tämä loisi mahdollisesti tarvetta suunnitteluohjeiden uudistamiselle, ellei korkea varmuustaso ole määräysten muuttuessa elinkaarimitoituksen takia perusteltu.

Tutkimuksessa tullaan vertaamaan Tiehallinnon ja Ratahallintokeskuksen paalulaattoja koskevia suunnitteluohjeita suunnitteluperiaatteiden yhtäläisyyksien ja eroavaisuuksien löytämiseksi. Yhdessä esimerkkikohteiden

suunnitelmien ja suunnitteluohjeiden vertailun kanssa tällä luodaan pohjaa mahdollisuudelle yhtenäistää suunnitteluohjeet.

Vertailut pitää tehdä rakenteiden sekä geotekniseen että rakenteelliseen toimintatapaan perustuen. Tällöin pitää paalulaatan rakenteellisesti toimia laattarakenteena ja paalujen täyttää laatuvaatimukset niin geoteknisesti kuin rakenteellisesti mitta- ja sijaintipoikkeamien määäämissä rajoissa.

Lopuksi analysoimalla esimerkkeinä toimivien vauriotapausten vaurioiden syyt sekä suunnitteluohjeiden laatuvaatimusten erilaisuudet voidaan ehdottaa suunnitteluperiaatteiden yhtenäistämistä siten, että paalulaattojen ja niitä kannattavien paalujen geotekninen ja erityisesti rakenteellinen toiminta on varmistettu.

Vaurioituneita rakenteita tarkastellaan niiden korjausmenetelmien osalta. Näihin harvinaisiin ja useimmin todella vaativiin toimenpiteisiin tartutaan yleensä liian myöhään. Koska kaikkia paalulaattakohteita ei ole kirjattu tierekistereihin, voidaan epätasaisuutena tien pinnassa näkyvien lievien vaurioiden osalta tyytyä tasoittamaan tien epätasaisuus uudella päällysteellä. Menetelmä ei kuitenkaan toimi korjausmenetelmänä, vaan itse asiassa lisää pysyviä kuormituksia ja voi johtaa lopulta rakenteen sortumiseen. Vakavampien vaurioiden osalta usein ainoa tehokkaaksi todettu korjausmenetelmä on rakenteen täydellinen uusiminen. Tarkoituksena on kartoittaa vaurioituneiden paalulaattarakenteiden korjausmenetelmiä ja vertailla näiden toimivuutta rakenteen koko elinkaaren kannalta.

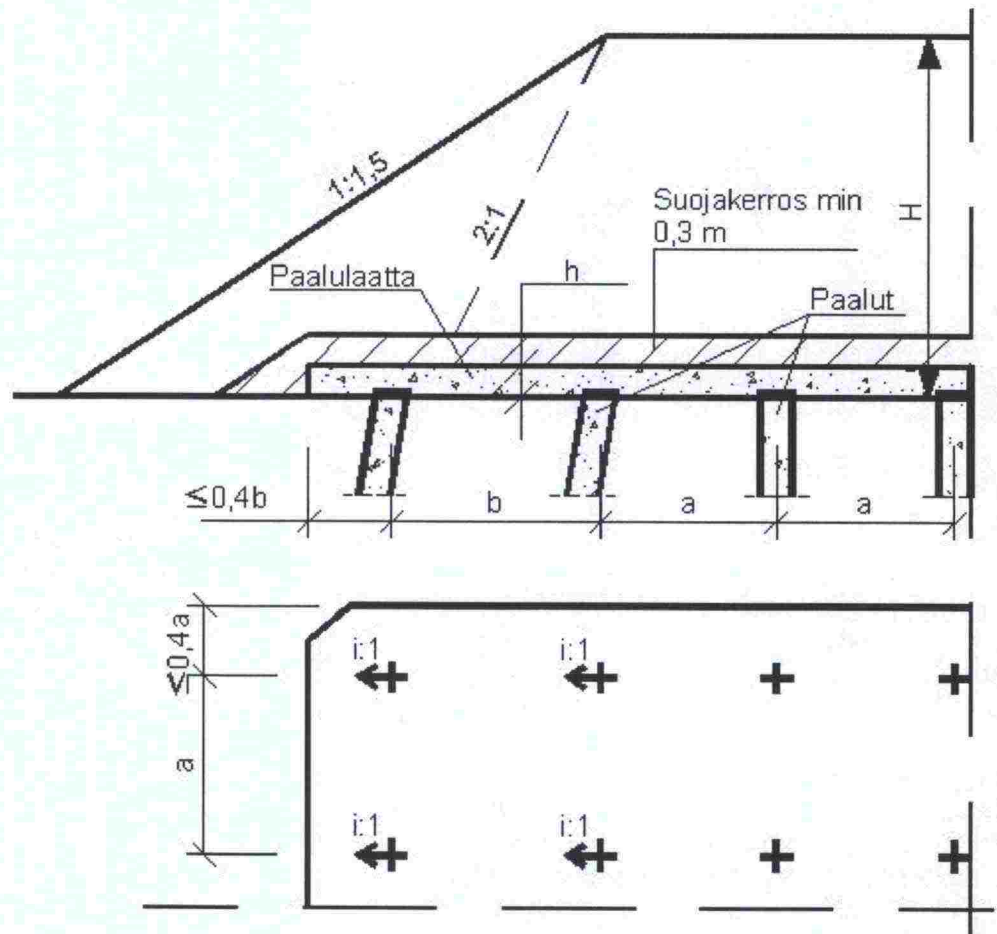


## 2. PENKEREEN PERUSTAMINEN

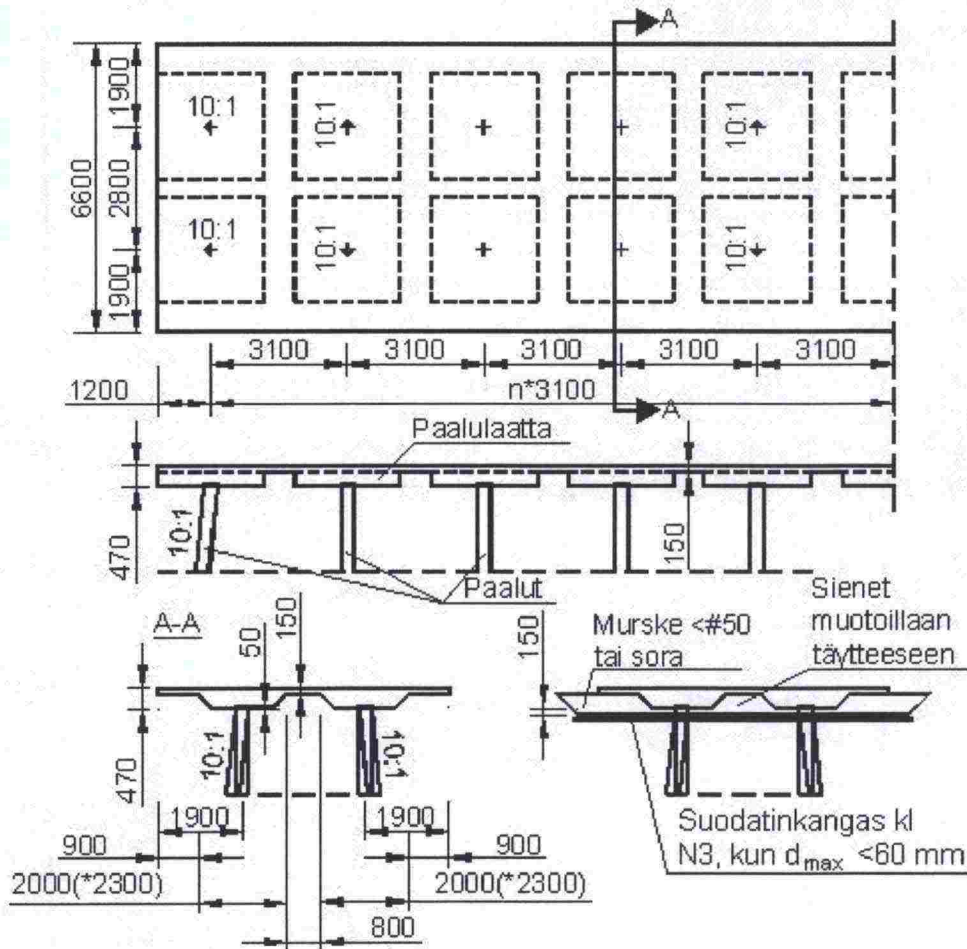
### 2.1 Paalulaattarakenteet

Perustamistavan valinta, joka tehdään teknistaloudellisten vaihtoehtovertaailujen perusteella ottaen huomioon paikalliset olosuhteet ja ympäristötekijät /18/, heijastuu koko rakenteen elinkaaren kustannuksiin. Näin onkin perusteltua, että perustustavan valinnan pitää olla sidoksissa erityisesti alueen pohjasuhteisiin, mutta myös rakenteen kuormituksen suuruuteen.

Pengerpaalutus käsittää kaksi toisistaan käyttöalueiltaan poikkeavaa rakennetta: paalulaattarakenteen ja paaluhatturakenteen. Kuvissa 2.1 ja 2.2 on esitetty paalulaattarakenteen osat Tiehallinnon tasapaksun laatan ja Ratahallintokeskuksen sienilaatan osalta.



Kuva 2.1. Tasapaksun laatan periaatekuva /18/.



Kuva 2.2. Sienilaatan periaatekuva /7/.

Paalulaattarakenne on yhtenäinen paaluilla perustettu teräsbetoninen laatta. Tiehallinnon julkaisun: Paalulaattojen ja paaluhattarakenteiden suunnitteluohje, mukaan paalulaattarakenteeseen katsotaan kuuluvaksi laatta ja paalut sekä laatan päälle tuleva suojakerros. Rakennetta kuormittaa pysyvä kuormana maapenger. Paalulaatta on painumaton rakenne maarakenteiden perustamiseen pehmeillä ja kokoonpuristuvilla maapohjilla. /18/

Paalulaattojen ja paaluhattarakenteiden suunnitteluohjeen paalulaattarakenteen määritelmästä poiketen paalulaattarakenteeseen pitäisi lisäksi katsoa kuuluvaksi ainakin se osa pengertä, joka on varattu liikenteelle. Paalulaatan tarkoitushan on kantaa sen päälle rakennettu pengersiten, että penkereen plastisilta muodonmuutoksilta vältytään.

Ratahallintokeskuksen mukaan paalulaattarakenne määritellään seuraavasti: Paalulaatat ovat joko paikalla valettuja tai elementtirakenteisia paaluilla kannatettuja radan rakenteita, joiden yläpinnan syvyys on vähintään Kv-1,4m. Paalulaatan kuormat siirretään paaluilla kantaville maakerroksille tai kalliolle. /7/ Rakenteiden yläpinnan syvyys tarkoittaa tässä pengerpaksuutta.

Paalulaattaa käytetään kohteissa, joissa paaluperustuksen käyttö on tarpeellista, mutta paaluhattarakenteen käyttö ei ole teknillisesti mahdollista tai taloudellisesti perusteltua /18/. Paalulaattojen ja paaluhattarakenteiden suunnitteluohje.



nitteluohjeessa opastetaan: Vaikeasti paalutettavissa pohjasuhteissa on käytettävä paalulaattaa /18/. Näihin vaikeasti paalutettaviin pohjasuhteisiin voidaan Tiehallinnon mukaan lukea seuraavat kohteet:

- Pehmeä maaperä, jonka päällä ohut kuivakuorikerros
- Siltojen tulopenkereet ja keilat
- Syvät pehmeiköt
- Matalat penkereet
- Loivat luiskat ja vierustäytöt
- Varautuminen myöhempään tien leventämiseen ja tuleviin kuormitus-tilanteen muutoksiin

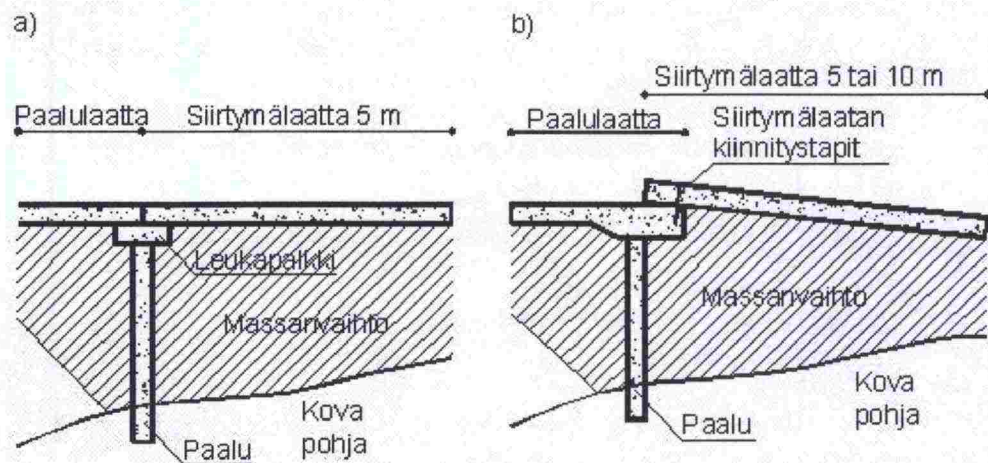
Syvien pehmeikköjen osalta lienee tarpeellista mainita paalulaattarakenteen käyttöalueena nimenomaan turve- ja liejupehmeiköt.

Ratahallintokeskuksen suunnitteluohje: RMYTL 3 Perustamis- ja vahvistamistyöt, määrittelee paalulaatan käyttöalueen seuraavasti: Paalulaattoja käytetään pehmeiköillä /7/.

Tiehallinnon ja Ratahallintokeskuksen suunnitteluohjeet eivät lähtökohdiltaan poikkea toisistaan paalulaattarakenteiden käyttöalueiden osalta. Ratahallintokeskuksen lievämpi ilmaus rakenteen käyttöalueista johtunee paalulaattarakenteen määräävästä asemasta ratarakenteiden pehmeikkörakentamisessa paaluhatturakenteisiin verrattuna. Paaluhatturakenteiden käyttö ratarakentamisessa rajoittuu lähinnä hidasliikenteisiin ratoihin, joissa liikenteen aiheuttamat dynaamiset kuormitukset pysyvät kokonaiskuormitukseen nähden pieninä.

### **Siirtymälaatat**

Siirtymäarakenteissa käytetään yleisesti teräsbetonista, usein elementtirakenteista siirtymälaattaa. Siirtymälaatan tehtävänä on rajoittaa perustusmenetelmien välisistä painumaeroista aiheutuvaa pintarakenteen pituussuuntaista kulmakiertymää. Siirtymälaatta, joka toisesta päästään tukeutuu paalulaataan, on toisessa päässään maanvarainen. Tiehallinnon mukaan liitos paalulaatan ja siirtymälaatan välillä on nivelinen, jolloin siirtymälaatta on osittain paalulaatan päällä. Ratahallintokeskuksen suunnitteluohjeessa samainen liitos hoidetaan leukapalkilla, jolloin laatat ovat samassa tasossa. Siirtymälaatan pituudeksi Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnitteluohje esittää 5 tai 10 metriä. Ratarakenteissa käytetty siirtymälaatanpituus on 5 metriä. Kuvassa 2.3 on esitetty periaatteet siirtymälaatan liittymisestä paalulaataan.



Kuva 2.3. a) Siirtymälaatan liittyminen paalulaattaan Ratahallintokeskuksen mukaan. /7/ b) Siirtymälaatan liittyminen paalulaattaan Tiehallinnon mukaan. /18/

Paalulaattarakenteen päähän tulevan siirtymälaatan leveys valitaan joko koko paalulaatan levyiseksi tai liikennekuormituksen oletetun jakautumisen perusteella. Kun siirtymälaatan leveys valitaan liikennekuormituksen jakautumisen mukaan, pitäisi pohjamaan leikkauslujuuden olla riittävä penkereen luiskin osalta aiheutuvan kuormituksen kantamiseen. Leikkauslujuudeltaan heikolla pohjamaalla on riski penkereen luiskin liukumiselle, mikäli siirtymälaattaa ei ole suunniteltu riittävän leveäksi. Samat näkökohdat koskevat myös itse paalulaattaa, minkä vuoksi siirtymälaattoja käytetään tapauskohtaisesti myös paalulaattojen reunoilla.

## 2.2 Vaihtoehtoiset rakenteet

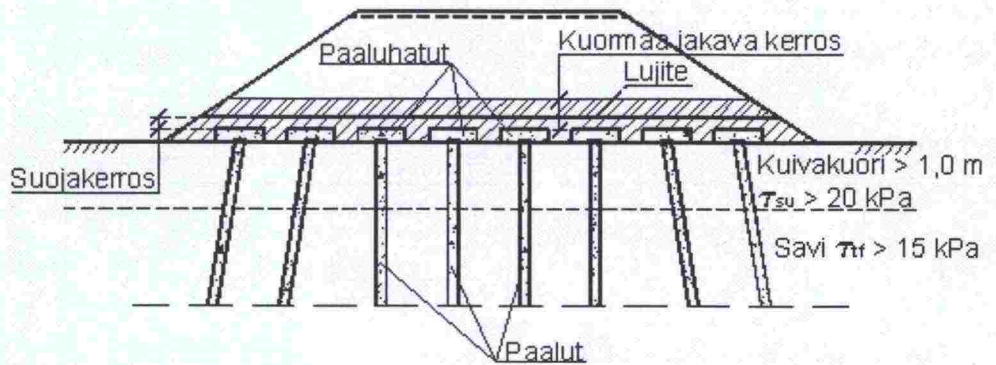
### 2.2.1 Vaihtoehtoisen rakenteen valinta

Vaihtoehtoisilla rakenteilla tarkoitetaan tässä kohtaa yleisesti rakenteita penkereiden perustamiseen. Kullakin rakenteella on tällöin oma teknillistaloudellisesti perusteltu käyttöalueensa, joka rakennetta valittaessa pitää muistaa. Rakenteiden käyttöalueiden ollessa osittain limittäiset määräävät myös materiaalien hinnat ja saatavuus usein perustamismenetelmän.

### 2.2.2 Paaluhatturakenteet

Paaluhatturakenne on erillisten paaluilla perustettujen paaluhattujen muodostama rakenne. Paaluhatturakenne muodostuu paaluhatuista ja paaluista sekä hattujen päälle ja väliin rakennettavasta kuormaa jakavasta kerroksesta, jonka alaosa toimii paaluhattujen suojakerroksena. /18/ Rakenteeseen voidaan lisäksi katsoa kuuluvan erilaiset lujitteet kuten suodatinkankaat ja teräksiset tai synteettiset lujiteverkot, joiden tarkoituksena on siirtää kuormitukset paaluhatuille dynaamisten, raskaiden kuormitusten alaisina. Kuvassa 2.4 on esitetty periaate paaluhatturakenteesta.





Kuva 2.4. Paaluhatturakenteen osat ja käyttöalueet Tiehallinnon mukaan /18/.

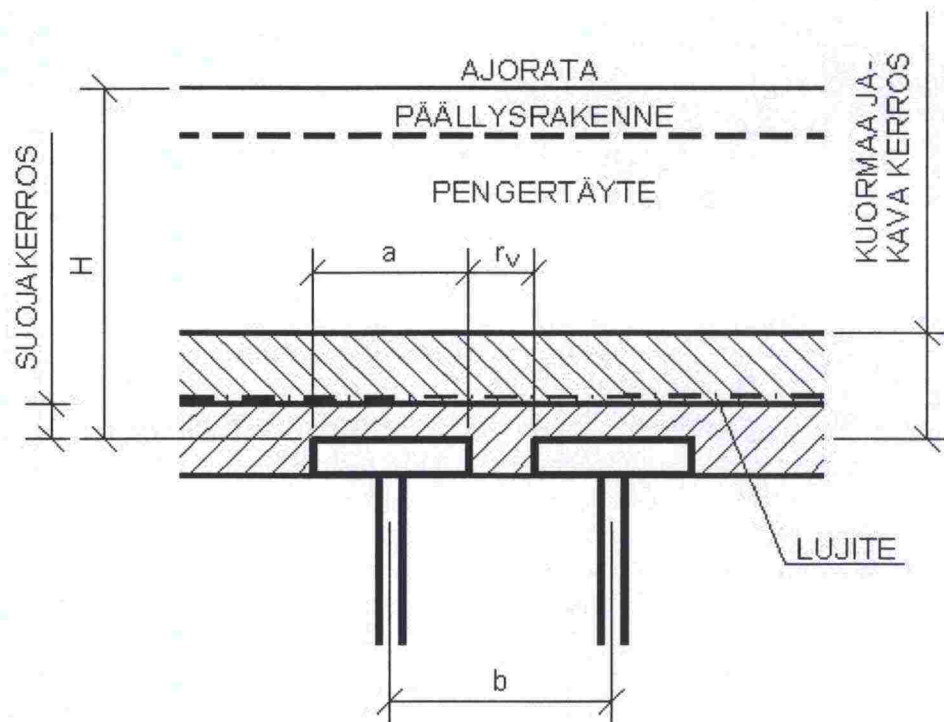
Paaluhatturakenteen käyttökohteet ovat kuten paalulaattarakenteillakin pehmeikkörakentamisessa. Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnitteluohjeen mukaan tyypillisiä käyttöalueita ovat kiinteät savikot, joissa pehmeän kerroksen leikkauslujuus on riittävä estämään hattujen välissä olevan materiaalin valumista sekä tukemaan paaluja ja paaluhattuja rakentamisvaiheessa ja sen jälkeen /18/. Tällä tarkoitetaan normaalipenkereen osalta pohjamaan savikon leikkauslujuutta vähintään 15 kPa vaatimusta ja kuivakuorisaven leikkauslujuuden vähintään 20 kPa. Leikkaustason alle on tällöin jätävä vähintään 1 metri kuivakuorta. Kuivakuoren puuttuessa saven leikkauslujuuden on oltava vähintään 20 kPa. Sillan taustapenkereellä ja keiloissa paaluhatturakennetta voidaan käyttää, kun saven leikkauslujuus kuivakuoren alla on vähintään 20 kPa. Sillan taustapenkereeksi katsotaan nelinkertaisen pengerkorkeuden pituinen osuus maatuen takana, kuitenkin vähintään 10 metriä /18/. Tiehallinnon mukaan paaluhatturakennetta ei saa käyttää turvepehmeiköillä. Sama vaatimus pitää asettaa myös liejupehmeiköille.

RMYYTL 3, Perustamis- ja vahvistamistyöt, mukainen käyttöalue paaluhatturakenteille on seuraava: Kolmen paalun elementtilaattoja ja paaluhattuja käytetään radan perustamiseen vastaavan tyypisissä maaperäolosuhteissa kuin paalulaattoja. Rakenteiden valintaan vaikuttavat rakentamisolosuhteet /7/. Nykyisin kolmen paalun elementtilaattojen käyttö on korvattu neljän paalun elementtilaattalla. Lisäksi mainitaan seuraavasti: Paaluilla perustettu ratapenger suunnitellaan ja rakennetaan siten, että sen painumat ja siirtymät ovat rakenteen kannalta merkityksettömät /7/.

Holvaus eli kuormitusten siirtyminen paaluhatuilla toimii huonosti, kun kuormitus on dynaaminen tai paaluhattujen yläpuolisen maan läpi virtaa vettä tai maa altistuu toistuvasti jäätymiselle ja sulamiselle /7/. Paaluhatturakenteiden käyttöä muiden kuin staattisten, ajan suhteen muuttumattomien kuormien osalta pitäisikin välttää. Erityisesti korkealuokkaisten tie-, rata- tai katuosuuksien osalta, joissa esiintyy dynaamisia, ajan suhteen muuttuvia kuormituksia, pitäisi paaluhatturakenteiden käytöstä luopua. Uusien julkisten ratakankkeiden osalta paaluhatturakenteiden käytöstä onkin nykyisin luovuttu. Paaluhatturakenteiden mitoituksista todetaan vain, että nykyisin paaluhatturakenteet mitoitetaan rakoväliin ja peitto-osuuteen perustuen. Rakoväli on paaluhattujen väliin jäävä osa (kuva 2.5) ja peitto-osuus paaluhattujen poikkipinta-alan suhde kokonaispinta-alaan. Tarkemmin paaluhatturakenteiden



mitoitukseen voi tutustua esimerkiksi Jari Maran diplomityössä: Puupaaluilla perustettujen tierakenteiden vauriot ja korjausmenetelmät, vuodelta 2000.



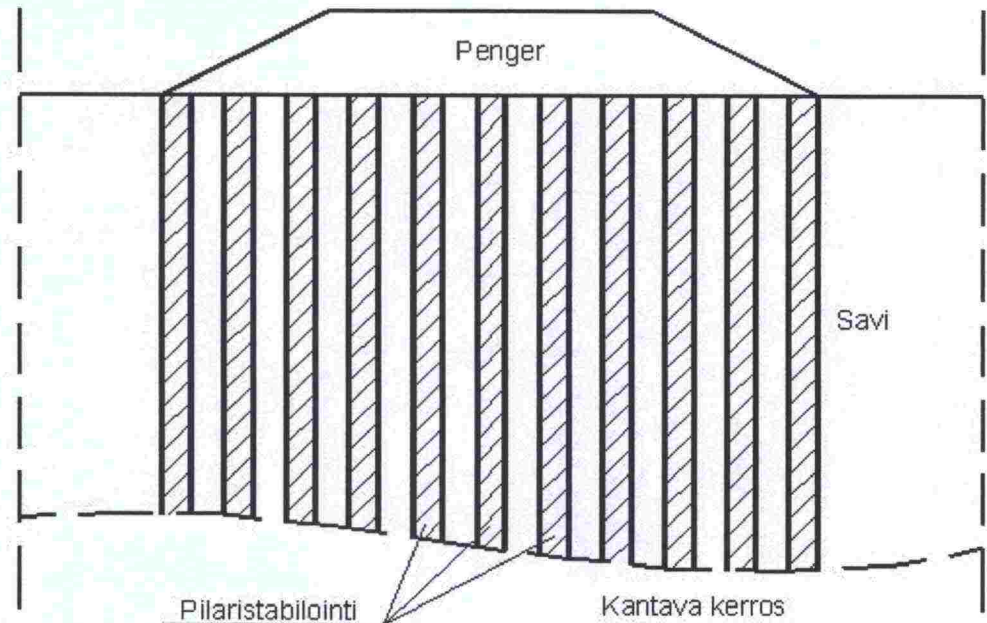
Kuva 2.5. Penkereen osat /18/.

### 2.2.3 Muut vaihtoehtoiset rakenteet

#### Pilarisylvästabilointi

Tiehallinnon julkaisussa: Syvästabiloinnin suunnitteluohje, käsitellään kahta syvästabilointimenetelmää: ns. kuivamenetelmällä tehtävää pilaristabilointia sekä massasyvästabilointia. Pilaristabiloinnin osalta on Suomessa lähes yksinomaan käytetty kuivamenetelmää, jossa sekoitinkärkeä nostettaessa jauhemainen sideaine syötetään paineilmaa käyttäen maakerrokseen. Märkämenetelmän käyttö on Suomessa ollut toistaiseksi koeluonteista.

Pilaristabilointi on ensisijaisesti savisen pehmeikön vahvistusmenetelmä. Sen käyttökohteita ovat penkereiden ja putkijohtojen perustaminen sekä leikkauspohjan vahvistaminen. Pilaristabiloinnin toimivuus heikkenee, mikäli maaperässä on eloperäisiä maakerroksia kuten liejua tai turvetta. Kuvassa 2.6 on esitetty pilaristabiloinnin periaate.

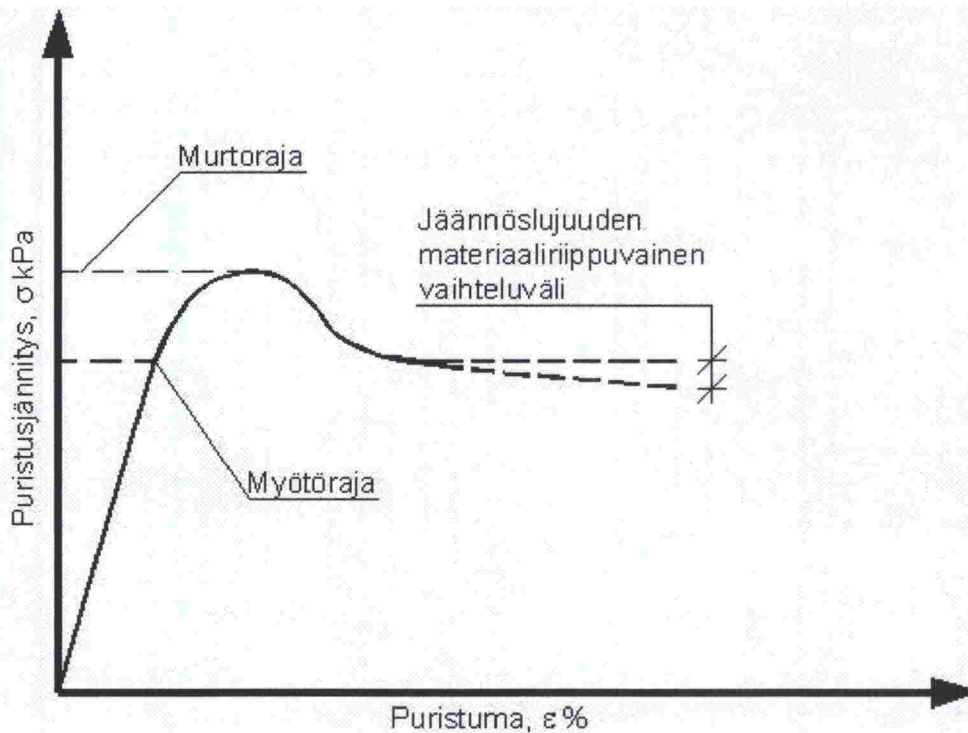


Kuva 2.6. Pilaristabiloinnin periaate /20/.

Pilarointia voidaan käyttää stabiiliteetin parantamiseen ja painumien rajoittamiseen. Stabilointi parantaa varsin hyvin tasaiselle maalle rakennettavan penkereen vakavuutta, kun varmuus sortumista vastaan on ilman stabilointiakin suurempi kuin 1,0 - 1,2. Jos alkutilanteen vakavuus on huonompi, maanpinta on kalteva, taikka penkereen sivulle tehdään kaivanto, stabiloinnin tehokkuus on huonompi ja lopputulos herkempi stabiloinnin epäonnistumiselle. Tällaisissa tapauksissa pilareista yleensä muodostetaan yhtenäisiä seinämärakenteita, jotka paremmin kestävät sivusuuntaisia kuormia. /20/

Eniten pilarointia käytetään kuitenkin penkereiden painumien rajoittamiseen. Syvästabiloinnin suunnitteluohje määrittää pilaristabiloidun maan painumat seuraavasti: Käytettäessä kimmoisia eli puolilujia pilareita, jolloin pilarien myötörajaa ei ylitetä, penkereen painumat rajoittuvat rakennusaikana lähes välittömästi tapahtuvaan pieneen painumaan. /20/ Pilarin kuormitusmuodonmuutos-käyrä on esitetty kuvassa 2.7.





Kuva 2.7. Pilarin kuormitus-muodonmuutos-käyrä /20/.

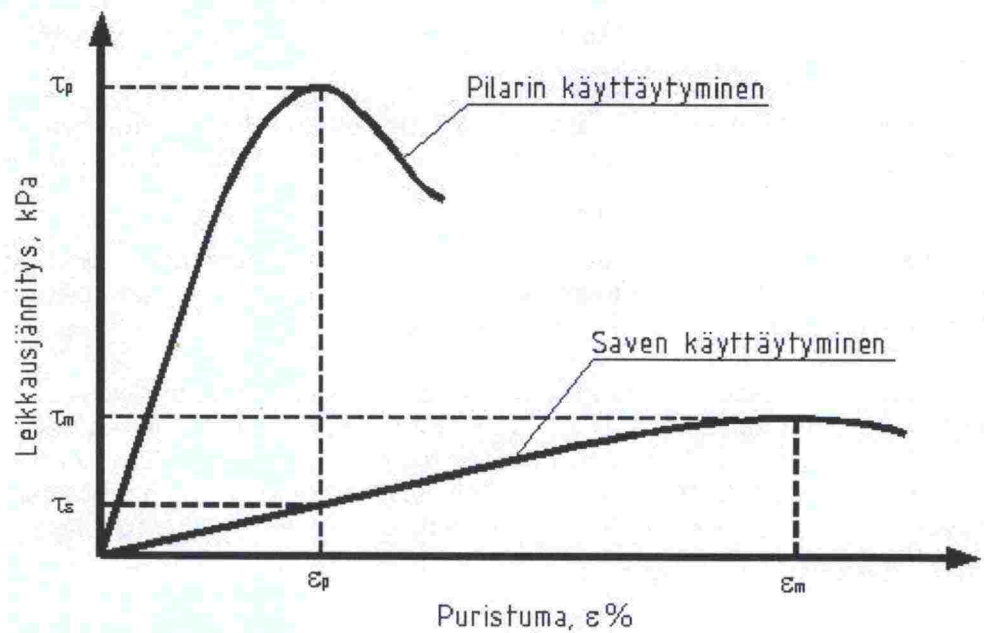
Pilaristabilointi voidaan Syvästabiloinnin suunnitteluohjeen mukaan mitoittaa kolmella tavalla: kimmoisena, myötäävänä tai määrämittaisena. Myötäävissä pilarissa pilarien myötökuorman, joka on noin 65-70 % murtokuormasta, oletetaan ylittyvän ja ylijäävän kuorman menevän pilareita ympäröivän maan kannettavaksi sekä pilarien kantavan jatkuvasti myötökuorman suuruisen kuorman. Pilareita ympäröivälle maalle tuleva pystykuormitus aiheuttaa maaperässä konsolidaatiopainuman, jota pilarien pystyjamainen vaikutus nopeuttaa. Painumat tapahtuvat tällöin yleensä muutamassa kuukaudessa. /20/

Syvästabiloinnin suunnitteluohje määrittää pilarien ja maan yhteistoiminnan seuraavasti: Pilaridussa maassa jännitykset jakautuvat pilareille ja pilareita ympäröivälle maalle muodonmuutosmoduulien suhteesta riippuvalla tavalla. Pilaroinnin mielekäs toimintatapa saavutetaan, kun ei pyritä kohtuuttoman suuriin pilarilujuuksiin hyvin pehmeässä pohjamaassa. Pilari on lujitettua maata eikä kantava rakenne. /20/

Stabiloituun maahan kohdistuvien pystysuorien jännitysten jakautumisessa on edellä mainitun lisäksi huomioitava myös pilareiden sekä pilareita ympäröivän maan pinta-alojen suhde. Tarkemmin pilareiden ja maan yhteistoimintaa on käsitelty esimerkiksi Jyrki Nikkisen diplomityössä: Syvästabiloitujen pilarien ja maan yhteistoiminta, vuodelta 2000.

Syvästabiloitu pilari ei myöskään ole raudoitettu. Tämä tarkoittaa, ettei se voi vastaanottaa taivutusta muutoin kuin kuormitettuna ja tällöinkin erittäin vähän. Ongelmiin voidaan ajautua kun pystysuoria pilareita kuormittaa maapenger. Tällöin maanpaineesta aiheutuva vaakakuorma voi aiheuttaa reu-nimmaisille luiskalla oleville ja kevyesti kuormitetuille pilareille liian suurta taivutusta.

Syvästabiloinnin suunnitteluohjeen mukainen oletus myötäämään mitoitettujen pilareiden toiminnasta on väärä. Kun kuormitettu pilari saavuttaa myötörajan, kuormittuu pilareita ympäröivä maa tällä kokoonpuristumalla vain vähäisessä määrin. Kun kuormitusta edelleen lisätään ja pilari saavuttaa murtokuoman, alenee sen vastaan ottama kuormitus huomattavasti, pilareita ympäröivän maan vastaan ottaman kuormituksen edelleen kehittyessä lähes lineaarisesti muodonmuutoksen suhteen. Pilareita ympäröivän maan vastaan ottama kuormitus kasvaa muodonmuutoksen suhteen vielä pitkään pilareiden murren jälkeen, jolloin pilari vastaan ottaa kuormitusta enää sen jäännöslujuudesta riippuvalla tavalla. Tilannetta on havainnollistettu kuvassa 2.8.



Kuva 2.8. Saven ja pilarin yleinen jännitys- muodonmuutuskäyttäytyminen /4/.

Määrämittaisia pilareita ei suunnitella ulottumaan painuvan kerroksen alarajaan /20/. Tällaiselle rakenteelle sallitaan harkitusti käyttöaikaisia painumia. Painumien laskenta on kuitenkin vaikeaa ja vaatii tavallista perusteellisemmat pohjatutkimukset. Diplomityössään: Määrämittaisen syvästabiloinnin mitoitus, vuodelta 2000 Petri Tyynelä toteaa mm. seuraavaa: Mitoitettaessa määrämittaista pilaroitinta tulee rakenteen painumanopeuden laskennassa huomioida kaksi toisiinsa nähden eri tavalla käyttäytyvää rakennetta /25/. Lisäksi johtopäätöksissään Tyynelä jatkaa: Määrämittaiselle pilaroinnille perustetulle rakenteelle täytyy antaa aikaa painua. Riittävän painuma-ajan jälkeen liikenteelle avatun tien odotettavissa olevat painumat on mahdollista mitoittaa asetettujen kriteerien sisällä. /25/

Pilaristabiloinnin mitoituksen kannalta on oleellista ymmärtää vaatimukset stabiloidun maan käyttäytymiselle. Vaatimukset jotka voivat olla hyvin erilaiset esimerkiksi rautateiden ja tie- tai katuverkon sallittujen muodonmuutosten suhteen rajaavat käytännössä käytetyn mitoitusmenetelmän. Mikäli selkeästi voidaan ennustaa stabiloinnin käyttäytyminen rakenteen koko elinkaar-ajan ajalta ja hyväksyä menetelmän valmiille rakenteelle aiheuttamat muodonmuutokset, on myötäämään mitoitettujen tai määrämittaisten pilareiden-



kin käyttö perusteltua. Kuitenkin korkealuokkaisten rakenteiden kuten nykyisen henkilöjunaliikenteen perustusrakenteiden vaatimukset käyttöajan muodonmuutosten suhteen ovat hyvin tiukat. Tällöin pilaristabilointia käytettäessä on pilarit käytännössä mitoitettava kimmoisina.

### Massanvaihto

Massanvaihto on käyttökelpoinen pohjanvahvistusmenetelmä heikosti kantavalla tai kokoonpuristuvalla pohjamaalla, kun kovan pohjan syvyys on enintään noin 5 metriä. Näin ollen menetelmä soveltuu matalille pehmeiköille sekä matalille soille, joilla kovapohja on välittömästi turpeen alla. Myös sivukaltevilla maapohjilla voidaan massanvaihtoa käyttää ratapenkereen vakavuuden parantamiseen. /7/

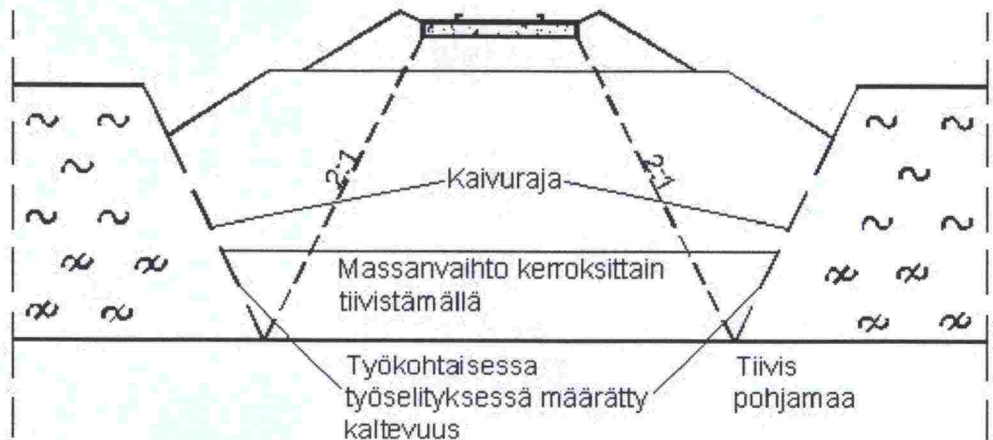
Massanvaihto voi olla teknillistaloudellisesti perusteltu myös edellä kuvattua syvemmilläkin pehmeiköillä, mikäli massanvaihtoon sopivaa materiaalia on lähistöllä riittävästi saatavilla.

Massanvaihtomenetelmät ovat kehittyneet nykyiseen muotoonsa jo 1960-luvulla. Myöhemmin on kehittynyt lähinnä kaivu- ja kuljetuskalusto, mikä on alentanut massanvaihdon yksikkökustannuksia. /22/

Ratahallintokeskuksen mukaan massanvaihto tehdään aina täydellisenä massanvaihtona kaivamalla, jolloin pehmeät ja lujuusominaisuuksiltaan heikot maakerrokset poistetaan kantavaan maakerrokseen asti. Massanvaihdon täyttömateriaaleihin ja rakenneratkaisuihin vaikuttavat rakennuspaikalla vallitsevat pohjasuhteet. /7/ RMYTL 3, Perustamis- ja vahvistamistyöt, mukaan erityyppisiä ratkaisuja ovat:

- Massanvaihto kuivaan kaivantoon
- Massavaihto vedenalaiseen kaivantoon
- Vesistöpengerrys

Tiehallinnon julkaisun: Massanvaihto, mukaan massanvaihto tehdään joko kaivamalla tai pengertämällä. Massanvaihdossa kaivamalla pehmeät maakerrokset poistetaan kaivamalla joko kovaan pohjaan tai määräsyvyyteen. Massanvaihtoa määräsyvyyteen kutsutaan myös osittaiseksi massanvaihdoksi. Täyttö tehdään yleensä päätypenkereenä luonnollisen maanpinnan tasoon. Menetelmä rajoittuu etupäässä melko mataliin pehmeikköihin (3...5 metriä). Käyttöalueena mainitaan RMYTL 3, Perustamis- ja vahvistamistyöt, ilmoittamien käyttöalueiden lisäksi massanvaihto herkästi vaurioituvien rakenteiden läheisyydessä sekä paalutettujen alueiden päissä, joissa paalupi-tuudet ovat lyhyet. /22/ Jälkimmäinen voi olla esimerkiksi siirtymärakenne kuten siirtyminen paalulaattarakenteelta massanvaihdolle. Kuvassa 2.9 esitetään periaate massanvaihdosta kuivaan kaivantoon.



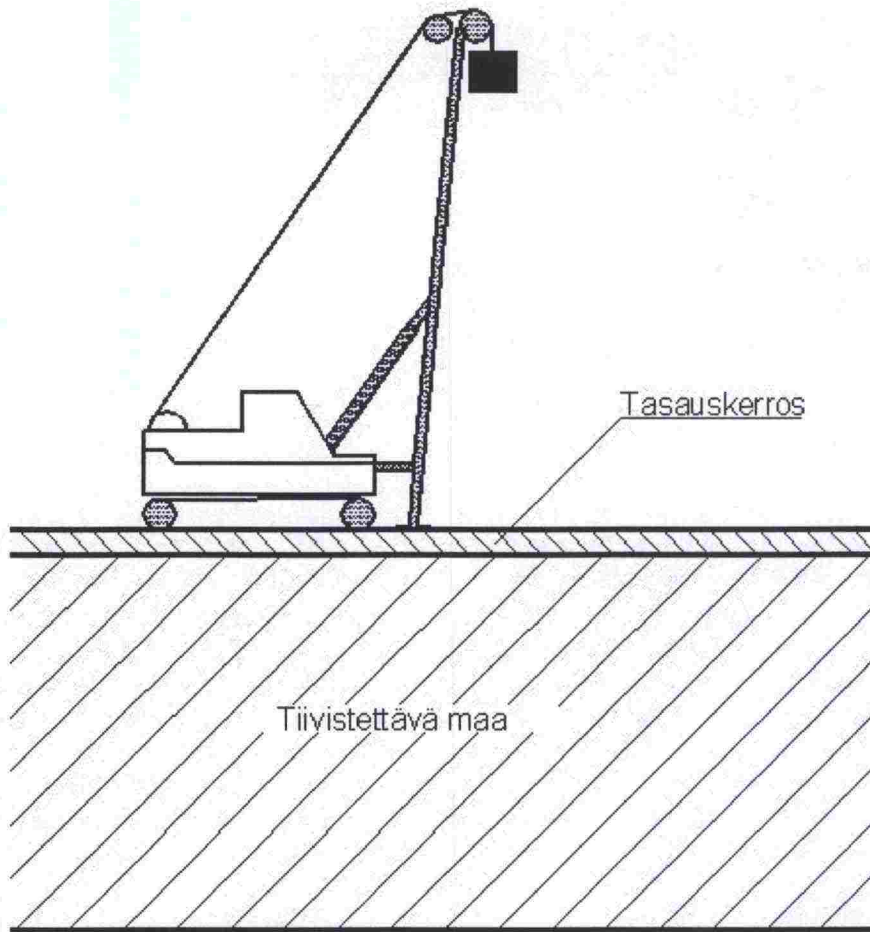
Kuva 2.9. Massanvaihdon kaivannon kaivurajat [7].

Täydellinen massanvaihto kaivamalla on perustamismenetelmänä varma joskin alueellisesti riippuen myös kallis ja luonnonmateriaaleja kuluttava ratkaisu. Käytännössä massanvaihto kaivamalla on teknillistaloudellisesti edullinen ratkaisu siellä, missä rakennettavan matalan pehmeikön lähettävillä on saatavilla luonnon soraa tai vastaavaa materiaalia. Mitä tiheämmin asutetuille alueille mennään, sitä pienemmiksi hyödynnettävät luonnon maa-alueet käyvät. Tällöin kuljetusmatkojen pidetessä, massanvaihto menetelmänä kallistuu. Nykyisin esimerkiksi pääkaupunkiseudulla massanvaihto perustamismenetelmänä ei ole taloudellisesti kannattavaa.

Massanvaihtoon kaivamalla liittyy geoteknisessä mielessä suuria haasteita toimittaessa tiheillä taajama-alueilla. Kaivuvaiheen suurin huolenaihe on tällöin alueellisen stabiileetin turvaaminen. Rakennetun kaivannon pitää säilyttää varmuus viereisten rakennusten tms. kaivantoon liukumista vastaan. Tämä saavutetaan kokonaistilanteen oikealla hahmottamisella, riittävän varmoilla suunnitelmilla, kattavilla seurantamittauksilla ja tietenkin taidokkaalla rakentamisella. Toinen ongelma tiheästi rakennetuilla alueilla havaitaan usein massanvaihto kaivantoa täytettäessä tai tämän jälkeen. Rakennettu massanvaihto aiheuttaa vaakasuuntaista maanpainetta ympäröiviin tilavuuspainoltaan keveämpiin maakerroksiin. Tämä voi muodostua ongelmaksi, kun esimerkiksi paaluille perustetun rakennuksen viereen perustetaan tie massanvaihtoa käyttäen. Tällöin massanvaihto aiheuttaa sivukuorimitusta rakennuksen alapuolisille paaluille, jotka voivat liiallisessa taivutuksessa pettää aiheuttaen yläpuolisen rakenteen sortuman. Helsingin kaupungissa tällainen pyritään estämään sopimuksella, joka kieltää maanpainetta tonttirajan ulkopuolelle siirtävän rakentamisen.

Tehtäessä massanvaihto vedenalaiseen kaivantoon, pitää massanvaihto syvätiivistää. Syvätiivistyksen periaate on esitetty kuvassa 2.10.





Kuva 2.10. Syvätiivistyksen periaate.

Syvätiivistystä voidaan vedenalaisen kaivannon lisäksi käyttää tiivistysmenetelmänä myös muissa massanvaihto kohteissa sekä varsinaisena pohjanvahvistusmenetelmänä lievästi kokoonpuristuvilla maakerroksilla.

Syvätiivistys, jota Pekka Vuola tarkemmin kuvaa lisensiaattitutkimuksessaan: Dynamic Compaction of Saturated Sand /26/, on pudotuspainon luovuttaman kinemaattisen energian muuttumista maaperässä kulkeviksi aalloiksi ja maan tilavuudenmuutoksessa tarvittavaksi työksi. Itse maaperän tiivistymisen hyötysuhdetta kuvaa siis plastisiin muodonmuutoksiin tarvittavan energian ja pudotuspainosta johtuvan kokonaisenergian suhde. Tietyt ominaisuudet omaavan tiivistettävän penkereen maksimi tiivistymissyvyys on saavutettavissa optimaalisella, pudotuspainosta ja pudotuskorkeudesta riippuvalla kinemaattisella energialla. Optimaalisen energian määrittäminen on käytännössä mahdollista vain kokeellisesti, maaperän tiiveyttä tarkkailemalla.

Syvätiivistyksen aiheuttaman tiivistymisen maksimi syvyys voidaan perinteisesti laskea Ménardin ja Broisen kehittämästä energiayhtälöstä 2.1.

$$D_{\max} = k * \sqrt{(m * H)} \quad (2.1)$$

, missä  $D_{\max}$  on maksimi tiivistymissyvyys [m]

k	on tiivistettävästä materiaalista riippuva kerroin
m	on pudotuspainon massa [tonnia]
H	on vapaa pudotuskorkeus [m]

Tiivistettävästä materiaalista riippuvan kertoimen k arvona voidaan käyttää taulukon 2.1 mukaisia kertoimen  $f_M$  arvoja.

*Taulukko 2.1. Tiivistettävästä materiaalista riippuvan kertoimen  $f_M$  arvot.*

Materiaali	$f_M$
Hiekkainen siltti	0,50 - 0,60
Silttinen hiekka	0,55 - 0,65
Hieno hiekka	0,6 - 0,7
Keskihiekka – sora	0,65 - 0,8
Humukseton täyttö	0,5 - 0,8
Murske- tai louhetäyttö $F < 600$	0,7 - 1

Syvätiivistyksen historian aikana on kertoimelle  $f_M$  esitetty arvoja 0,5 ja 1,0 väliltä maaperän ominaisuuksista ja tulkitsijasta riippuen. Yleistäen arvo 0,5 kuvaa hiekkaisen siltin tiivistymiskerrointa ja arvo 1,0 louhetäyttöä.

Syvätiivistyksessä tasauserroksen paksuus on riippuvainen erityisesti tiivistettävän kerroksen yläosan materiaalista. Riittävän paksulla tasauserroksella varmistetaan, ettei pudotuspaino uppoa tiivistettävään kerrokseen ja näin aiheuta maan murtoa. Lisäksi tasauserroksen paksuudella on tiivistymissyvyyttä lisäävä vaikutus. Ratahallintokeskuksen vaatimus 0,3 metrin tasauserroksesta on riittävä tiivistettävän materiaalin ollessa pienlouhetta rautateiden veden alaisissa massanvaihtokohteissa.

Tiivistyksen maksimi syvyyden kaavaa voidaan täydentää ottamalla huomioon edellä mainittu tasauserroksen paksuus ja laatu, mutta myös huomioiden kovan pohjan etäisyys tiivistettävän penkereen pinnasta. Tällöin tiivistymisen maksimisyyvyys voidaan laskea yhtälöstä 2.2.

$$D_{\max} = f_C \cdot f_M \cdot f_B \cdot \sqrt{(m \cdot H)} \quad (2.2)$$

, missä	$D_{\max}$	maksimi tiivistymissyvyys
	$f_C$	tasauserroksesta riippuva kerroin
	$f_M$	tiivistettävästä materiaalista riippuva kerroin
	$f_B$	kovan pohjan etäisyydestä riippuva kerroin
	m	pudotuspainon massa [t]
	H	vapaa pudotuskorkeus [m]

Tiivistettävästä materiaalista riippuvan kertoimen  $f_M$  arvona voidaan käyttää edellä taulukossa 2.1 mainittuja kertoimia. Tasauserroksesta riippuvalle kertoimelle  $f_C$  voidaan käyttää arvoja 0,7 – 1,0, joista pienempi kerroin kuvaa heikkoa ja suurempi hyvää tasauserrosta. Kertoimen  $f_C$  arvona voidaan käyttää taulukon 2.2 mukaisia tasauserroksen paksuudesta ja materiaalin ominaisuuksista riippuvia kertoimia.



*Taulukko 2.2. Tasauserroksen ominaisuuksista riippuva kerroin  $f_c$ .*

Materiaali	Tasauserroksen pak- suus [m]	$f_c$
Löyhä hiekka	0,5 – 1,0	0,5 – 0,8 *)
Tiivis hiekka	0,5 – 1,0	0,8 – 0,9
Sora	0,5 – 1,0	0,85 – 1
Murske	0 – 0,5	0,7 – 1

\*) Tasauserrosta ei pitäisi jättää tiivistämättä.

Kovan pohjan etäisyydestä riippuva kertoimen  $f_B$  arvo määräytyy väliltä 0,8 – 1,7. Kerroin  $f_B=1$  kuvaa tapausta, jossa kallio tai kova pohja on erittäin syväällä, eivätkä tiivistymissyvyyden alapuolisten maakerrosten ominaisuudet suuresti poikkea tiivistettävän materiaalin ominaisuuksista. Kertoimet  $f_B=1,7$  puolestaan kuvaa tapausta, jossa kallio on arvioidussa tiivistymissyvyydessä. Kerroin  $f_B$  voi saada myös arvoja alle yhden, mikäli maakerrokset tiivistymissyvyyden alapuolella ovat tiivistettävää materiaalia huomattavasti heikommat.

Jos työn aikana havaitaan, että työselityksessä määrättävää lopetuksen raja-arvoa on vaikea saavuttaa tai pudotuksen tehokkuuteen liittyy epäselvyyttä, on tehtävä pudotuspainon hidastuvuusmittauksia tiivistyksen tehon arvioimiseksi.

Massanvaihtoon pengertämällä on korkealuokkaisten rakenteiden osalta suhtauduttava kriittisesti. Kokoonpuristuvan maamassan syrjäyttäminen pohjamaan murtotilan ylittävällä kuormituksella on aina hallitsematon tapahtuma. Pohjapaineen ja itse pohjamaan ollessa syrjäytys tapahtumassa aina osittain vaihtelevia ovat poikkileikkauksen muoto ja saavutetut massanvaihdon tasot parhaimmillaankin ”sivistyneen arvauksen” tasolla. Tällöin voi rakenteen painumaprofiili olla hyvinkin vaihteleva niin poikkileikkauksen kuin pituusleikkauksen osalta. Ongelmiin voidaan penkereen stabiliteetin suhteen törmätä, kun lievästi sivukaltevan kovan pohjan ja massanvaihdon väliin on jäänyt ohut kokoonpuristuva kerros. Tällöin liukupinta kulkee massanvaihdon alla eikä massanvaihdon materiaalien ominaisuuksilla ole juurikaan merkitystä rakenteen vakavuuden suhteen. Massanvaihtoa pengertämällä ei myöskään voida käyttää taajaan rakennetuilla alueille, joilla syrjäytyvät maamassat aiheuttavat viereisten rakenteiden nousua.

## 2.3 Paalulaattarakenteen liittyminen muihin rakenteisiin

### 2.3.1 Liittyminen painumattomaan rakenteeseen

Liittyminen paalulaattarakenteen sekä muiden perustamismenetelmien välillä pitää suunnitella huolellisesti, koko hanketta tai rakennettavaa aluetta koskevien muodonmuutoskriteerien puitteissa. Koska sallitut muodonmuutokset esimerkiksi nopeasti liikennöidyllä rautatiellä ja kaduilla ovat hyvin erilaiset voivat luonnollisesti myös siirtymärakenteet olla erilaisin menetelmin perustettuja. Tällöin ei suurempia käyttöaikaisia muodonmuutoksia omaavaa perustusmenetelmää voida suoraan sulkea pois siirtymärakennetta valitta-

essa. Kunhan perustamismenetelmän käyttäytyminen koko rakenteen elinkaaren ajalta on tunnettua ja muodonmuutoskriteerit täyttävää, ei sen käytölle voida asettaa rajoituksia.

Paalulaatan siirtymärakenteen sekä välittömästi tätä seuraavan tie-, katu- tai rataosuuden perustusmenetelmän valinnan suorittaa kohteen geotekninen suunnittelija. Usein eri suunnittelu- ja toteuttajatahot omaavat erilaisia näkemyksiä siitä, kuinka valittu perustusmenetelmä geoteknisesti toimii. Tällöin pitää suunnittelijan tuntea riittävällä tarkkuudella perustamismenetelmän käyttäytyminen rakenteessa sekä menetelmän käyttöalueet ja mahdolliset puutteet. Seuraavissa kappeleissa käsitellään edellä käsiteltyjen vaihtoehtojen rakenteiden sekä siltarakenteen ja paaluhattarakenteen liittymistä paalulaattarakenteeseen.

RMYTL 3, Perustamis- ja vahvistamistyöt, määrittää siirtymärakenteiden käyttöalueen seuraavasti: Siirtymärakenteita käytetään tasaamaan ratapenkereen pituussuuntaisia painumaeroja. Painumaeroja syntyy, kun ratapenkeren perustamistapa muuttuu tai pohjasuhteet muuttuvat. Siirtymärakenteita tarvitaan muun muassa seuraavissa tilanteissa:

- Siirtyminen paalutukselta kovalle pohjalle
- Siirtyminen paalutukselta massanvaihdolle
- Siirtyminen paalutukselta syvästabiloinnille

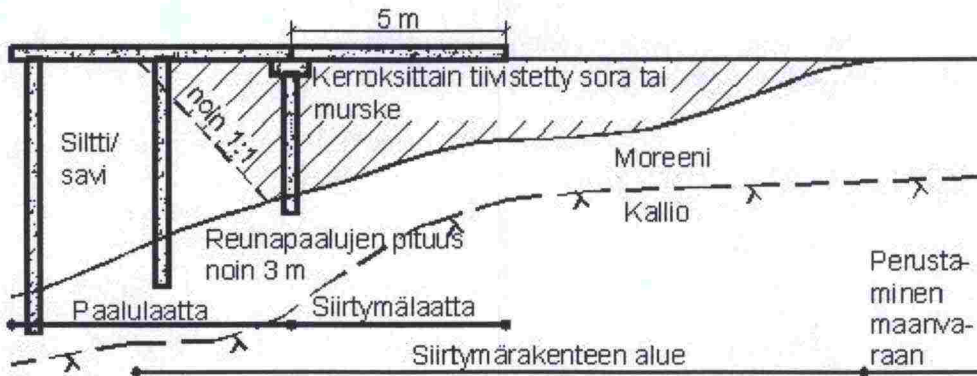
Näistä kaksi ensin mainittua voidaan oikein rakennettuina katsoa lähes painumattomiksi siirtymärakenteiksi. Siirtymärakenteessa syvästabiloinnille täytyy puolestaan aina varautua vähintään pienehköihin painumiin.

Paalulaattojen ja paaluhattarakenteiden suunnitteluohje esittää lisäksi siirtymärakenteen paalutuksen ja pystyjoitetun penkereen välillä. Rakenteen toimivuudesta todetaan vain mitä Tiehallinnon suunnitteluohjeessakin on todettu: Paalujen ja pystyjoitetun liittymiskohdat ovat usein epäonnistuneet ja vaativat toistuvia korjauksia /18/. Syynä tähän voidaan nähdä pengerpaalutuksen ja pystyjoitetun penkereen erilaiset painumaominaisuudet. Myös kiire rakentamisaikataulussa voi aiheuttaa lopulliseen rakenteeseen käytönaikaisia painumia. Tällöin yleensä esikuormitetun penkereen rakentamisaikainen painuminen ei ole vienyt maaperän konsolidoitumista loppuun.

### Liittyminen kovalle pohjalle

Siirryttäessä paalutukselta kovalle pohjalle tehdään paalutuksen päähän massanvaihto, joka ohenee kovan pohjan tasoon. Paalutukselta massanvaihdolle siirrytään siirtymälaatatalla, joka paalulaatan päässä tukeutuu palkin välityksellä paaluihin ja toisessa päässä massanvaihtoon. /7/ Kuvassa 2.11 on esitetty siirtyminen paalutukselta kovalle pohjalle Ratahallintokeskuksen mukaan.





Kuva 2.11. Siirtymärakenne paalutukselta kovalle pohjalle. /7/

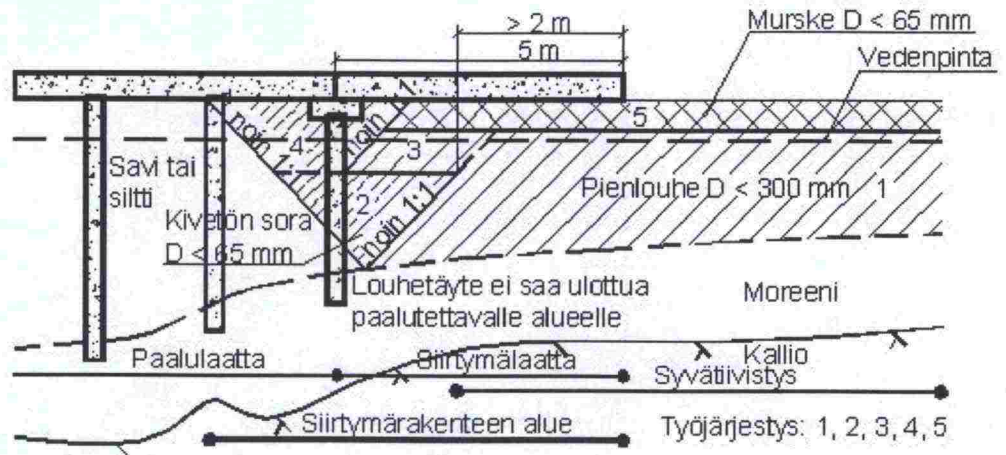
Ratahallintokeskuksen mukaan kaivanto täytetään paalutettavalla alueella kerroksittain tiivistäen kivettömällä soralla tai murskeelle ( $D < 65$ ). Muilla alueilla voidaan käyttää soraa, mursketta tai pienlouhetta. /7/

### Liittyminen massanvaihtoon

Siirtymärakenteessa paalutukselta massanvaihdolle kaivu- ja täyttötöyt tehdään ennen paalutusta. Ennen massanvaihtoa ei radan paalutusta saa tehdä niin lähelle tulevaa massanvaihto kaivantoa, että paalut voisivat liikkua massanvaihdon kaivun aikana /7/. Tiehallinnon suunnitteluohje suosittelee syvien ( $> 4...5$  m) massanvaihtojen osalle muutamien viikkojen työtaukoa täytön ja paalutuksen välisenä aikana. Tuona aikana massanvaihdosta aiheutuneet huokosylipaineet ja sivusiirtymät tasoittuvat merkittävästi.

Mikäli massanvaihto tehdään veden alle, tehdään se louheesta, joka syvätivistetään /7/. Kun massanvaihto tehdään kuivaan kaivantoon sopivat täyttömateriaaleiksi sora tai pienlouhe /7/. Pienlouheesta tehtävän massanvaihdon reuna ei saa ulottua paalutettavalle alueelle /7/. Paalulaattarakennetta ei saa liittää pengertämällä tehtävään massanvaihtoon /18/.

Paalutukselta massanvaihdolle siirrytään Ratahallintokeskuksen mukaan siirtymälaatatalla. Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnitteluohjeen mukaan siirryttäessä paalulaattarakenteelta massanvaihdolle ei siirtymälaattaa tarvita. Tämä huomattava toiminnallinen ero aiheutuu raideliikenteen tiukemmista vaatimuksista rakenteen painumien ja kulmakiertymien suhteen. Kuvassa 2.12 on esitetty siirtyminen paalutukselta massanvaihdolle Ratahallintokeskuksen mukaan.



Kuva 2.12. Siirtymärakenne paalutukselta massanvaihdolle /7/.

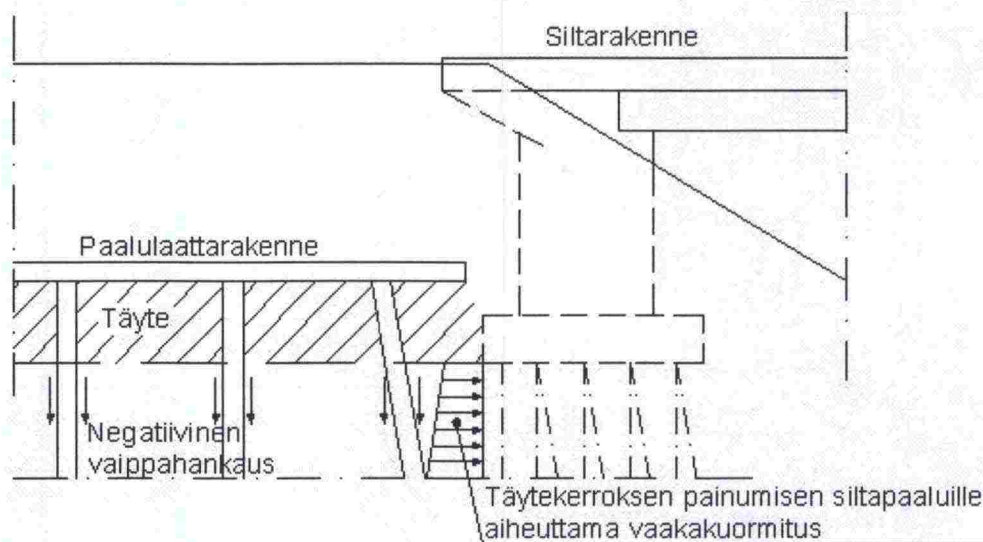
### Liittyminen siltarakenteisiin

Paalulaattarakenteiden liittymisestä siltarakenteisiin Paalulaattojen ja paaluhattarakenteiden suunnitteluohjeessa todetaan: Sillan tulopenkereen ja keulojen kohdilla käytetään pääsääntöisesti paalulaattaa /18/. Lisäksi kun Ratahallintokeskuksen osalta paaluhattarakenteen käyttö uusissa rakennuskohdeissa on kokonaan loppunut ovat viitteet paalulaattarakenteen toimivuudesta siltarakenteisiin liittyttäessä selkeät. Verrattaessa edellä käsiteltyihin vaihtoehtoihin rakenteisiin paalulaattarakenteen käyttö sillan tulopenkereellä on varmin ratkaisu pyrittäessä ehkäisemään sillan päätyjen, tulopenkereen puoleisia painumia.

Paalulaattarakenteen liittyessä siltarakenteeseen suunnitellaan paalulaatta tasoon tai viettämään sillasta poispäin. Paalulaatan sillan puoleisen päädyn korkeusasema suunnitellaan puolestaan sillan peruslaatan tasolle tai tätä ylemmälle tasolle.

Mahdolliset paalulaatan alustäytöt aiheuttavat painuessaan paaluille negatiivista vaippahankausta sekä sillan paaluihin kohdistuvaa vaakasuoraa maanpainetta. Tämä on huomioitava suunnittelussa. Ongelmaa on havainnollistettu kuvassa 2.13.





Kuva 2.13. Paalulaattarakenteen väärin valitun korkeusaseman aiheuttamat lisäkuormitukset paalulaatan liittyessä siltaan.

Penkereeseen kohdistuvat ulkoiset vaakakuormitukset ja penkereen pituussuunnassa vaikuttava vaakasuora maanpaine aiheuttavat paalulaattaan siltaan päin kohdistuvan vaakakuormituksen. Siltaan liittyvässä paalulaattarakenteessa tämä vaakakuormitus otetaan vastaan vinopaaluja käyttämällä.

Jos silta on perustettu ilman peruslaattaa, suoraan paaluille, jatketaan paalulaattaa yleensä luiskan osalle tämän riittävän varmuuden saavuttamiseksi.

Paalulaatan sijoittumisesta siltaan nähdessä Tiehallinnon suunnitteluohje ohjeistaa seuraavasti: Sillan maatuen peruslaatan ja hatun tai laatan reunan välinen minimietäisyys sekä vaaka-, että pystysuunnassa on 300 mm. Jos paalujen ja laatan tai hatun normaalitoleransseja tiukennetaan, voidaan em. arvoa pienentää. Rakenteen liittyessä siltapilareihin tai suurpaaluihin käytetään ensisijaisesti erillistä paalulaattaa. Paalun ja laatan reunan minimietäisyys on normaalitoleransseja käytettäessä 200 mm. /18/

Normaalitoleransseilla tarkoitetaan Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnitteluohjeen mukaisia paalujen sijaintitoleransseja sekä laatan ja hatun muototoleransseja.

Mikäli paalulaatta edellä mainitusta poiketen rakennetaan siltaan liittyväksi, pitää tämä huomioida silta- ja paalulaattarakenteiden rakenteellisessa mitoituksessa, jolloin rakenteet on suunniteltava samanaikaisesti.

Paalulaattarakenteen liittyessä siltarakenteeseen paalulaatan yhteydessä käytetään sillan maatuen yläosaan kiinnittyvää siirtymälaattaa.

### Liittyminen paaluhatturakenteeseen

Paalulaattarakenteen liittyminen paaluhatturakenteeseen tulee kyseeseen lähinnä olemassa olevien teiden, ratojen tai katuojen korjaamisen yhteydessä tai näitä levennettäessä. Koska nykyiset määräykset paalulaatta- ja paalu-

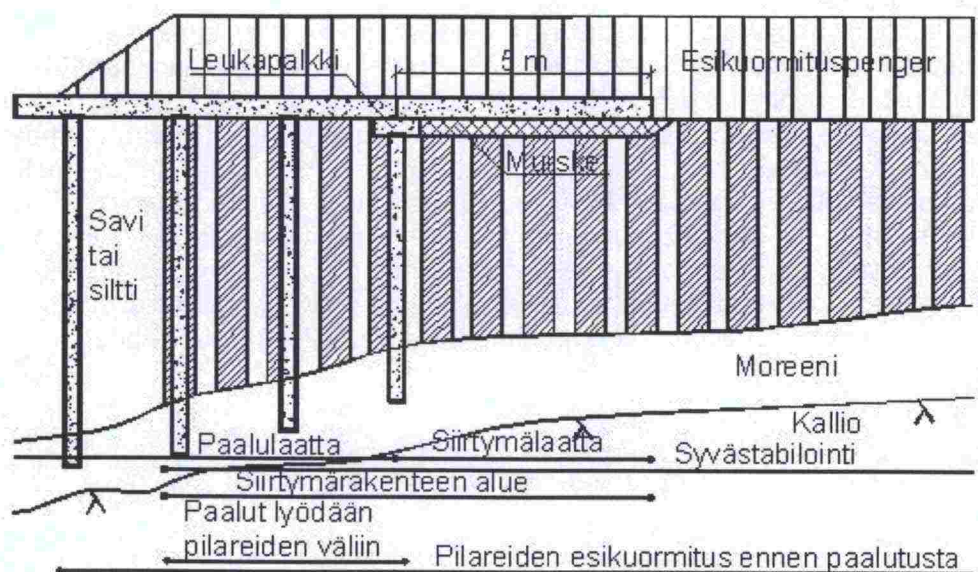
haturakenteiden käyttöalueista ovat erilaiset, on olemassa oleva rakenne usein paaluhaturakenne, johon uusi paalulaattarakenne liittyy.

Paalulaattarakenteen liittyessä paaluhaturakenteeseen on suunnittelussa usein huomioitava muita siirtymärakenteita useampia riskitekijöitä. Riskit, jotka pääosin liittyvät kaivuihin tai läjityksiin sekä paalutuksen aiheuttamiin vaakasuoriin kuormituksiin, aiheuttavat helposti paaluhaturakenteen paaluille siirtymiä, joita nämä kestävät heikosti. Tällaisessa siirtymärakenteessa pitäisi erityisesti huomioida kappaleessa 5 esitetyt toimenpiteet paalutustyön ympäristöön kohdistuvien vaikutusten vähentämiseksi sekä kappaleessa 4 esitetyt toimenpiteet paalulaatan valualustan painumisen vähentämiseksi.

### 2.3.2 Liittyminen painuvaan rakenteeseen

#### Liittyminen pilarisyvästabilointiin

Siirryttäessä paalulaattarakenteelta syvästabilointiin ovat rakennusvaiheet julkaisun: RMYTL 3, Perustamis- ja vahvistamistyöt mukaan seuraavat: Ensin tehdään syvästabilointityöt. Tämän jälkeen syvästabilointi esikuormitetaan tapauskohtaisen työselityksen mukaan. Työselityksessä tulee esittää esikuormituspenkereen korkeus sekä laajuus, esikuormitusaika ja painumarajat. Esikuormitus saatetaan loppuun ja kuormituspenger puretaan ennen paalutuksen aloittamista. Esikuormituksen loppuunsaattaminen voidaan varmentaa painuma- tai huokospainemittauksin tai poikkileikkausvaaituksin. Paalutuksen jälkeen suoritetaan paalulaatan sekä siirtymälaatan työt. Siirtymälaatan kohdalle tehdään 300 mm murskearina murskeesta 0...65 mm. Murskearina tasataan ja tiivistetään siirtymälaatan alapinnan tasoon. Siirtymälaatta tukeutuu toisesta päästään paalulaattaan leukapalkin avulla. Kuvassa 2.14 on esitetty periaatekuva siirtymärakenteesta paalutukselta syvästabiloinnille Ratahallintokeskuksen mukaan.



Kuva 2.14. Siirtymärakenne paalutukselta syvästabiloinnille /7/.



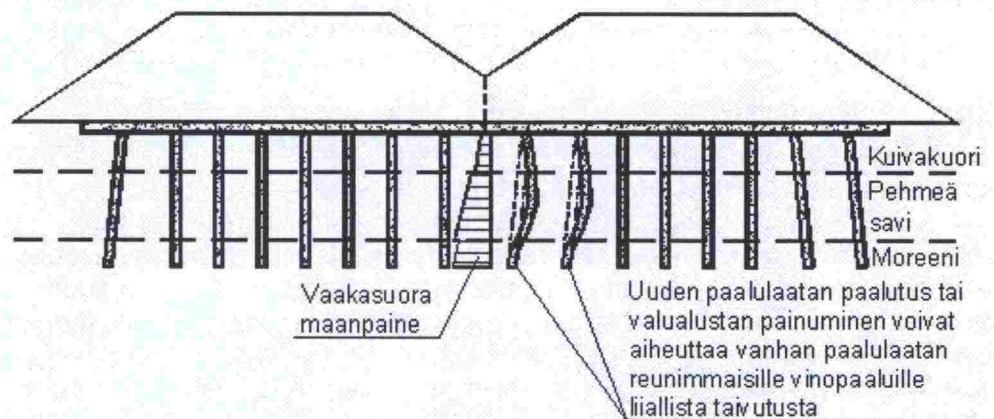
Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnitteluohjeen mukaan rakenteen esikuormitusta ei vaadita, mutta paalujen lyönti pilarikentän vieressä voidaan aloittaa vasta kun syvästabiloitujen pilareiden on todettu saavuttaneen suunnitellun lujuutensa. Pengerkevennyksen ja siirtymälaatan tarve arvioidaan suunnitteluvaiheessa syvästabiloidun kentän lasketun käyttöajan painuman perusteella /18/. Edellä mainittu tarve tarkistetaan pilareiden seurantamittausten tulosten perusteella /18/.

## 2.4 Varautuminen paalulaattarakenteen leventämiseen

Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnitteluohje rajaa pengerpaalutettujen rakenteiden leventämisen seuraavasti: Yleensä vain paalulaatan leventäminen on mahdollista. Vanhan pengerluiskan kohdalla olevat vinopaalut joudutaan tällöin levennyksen määrästä riippuen joko osittain tai kokonaan korvaamaan pystypaaluilla. Levennettävällä alueella on suositeltavaa käyttää paaluhatturakenteen sijasta paalulaattaa. /18/

Lähtökohtana paalulaattarakenteen mitoitukselle pitäisi perusteellisten pohjatutkimusten lisäksi olla riittävän tarkka käsitys lähialueiden tulevasta kehityksestä ja sitä kautta liikenneväyliin kohdistuvista laajennus tarpeista. Mikäli rakennettavalle tie-, katu- tai rataosuudelle oletetaan kohdistuvan tulevaisuudessa leventämistarvetta, on perinteisten, paalulaatan poikkileikkauksen suuntaisten vinopaalujen käyttö rakenteen elinkaarta ajatellen kallis ratkaisu. Kun ensin rakennettavan paalulaatan mitoituksessa penkereestä aiheutuvat vaakakuormat otetaan laatan raudoituksessa huomioon, vältetään käyttämästä laatan reunoilla vinopaaluja. Tällöin myöhemmin rakennettava paalulaatta ei aiheuta ensin rakennetulle paalulaatalle kalliita korjaustoimenpiteitä.

Olemassa olevan vinopaaluilla perustetun paalulaatan reunimmaisilla vinopaaluilla on riski saada liiallista, vaakasuorasta maanpaineesta aiheutuvaa taivutusta. Vinopaaluihin kohdistuvaa, vaakasuoraa maanpainetta voivat aiheuttaa uuden paalulaatan paalutustyö sekä valualustan painuminen. Myös valualustan painumisesta aiheutuva negatiivinen vaippahankaus voi osaltaan taivuttaa olemassa olevan laatan vinopaaluja. Lisäksi ongelmana paalulaatan leventämisessä voidaan pitää liian lähellä olemassa olevaa paalulaattaa tapahtuvaa kaivua. Tällöin uuden paalulaatan vaatima kaivutyö voi aikaansaada sivusiirtymiä olemassa olevan laatan paaluissa. Ongelma korostuu paaluhatturakennetta levennettäessä, minkä vuoksi paaluhatturakenteita ei suositellakaan levennettäviksi. Kuvassa 2.15 pyritään havainnollistamaan paalulaattarakenteen leventämiseen liittyvää ongelmallisuutta.



*Kuva 2.15. Vinopaaluilla perustetun paalulaattarakenteen leventämi-  
seen liittyvä ongelma.*



### 3. KÄYTTÖALUEET JA KUORMAT

#### 3.1 Rautatiet

##### 3.1.1 Käyttöalueiden määräytyminen

Ratarakenteiden osalta paalulaattarakenteiden käyttöalueet määräytyvät sekä pohjamaan ominaisuuksien että radan alus- ja pohjarakenteiden suunnittelukriteerien mukaan. Radan alus- ja pohjarakenteiden suunnittelukriteerien lähtökohtana voidaan pitää Ratahallintokeskuksen julkaisun: Ratatekniset määräykset ja ohjeet, osa 3, Radan rakenne, mukaista rajausta alus- ja pohjarakenteiden käyttöäille: Radan alusrakenteen samoin kuin mahdollisten vahvistus- ja pohjarakenteiden käyttöikävaatimus on 100 vuotta /6/. Muita paalulaattarakenteiden käyttöalueisiin liittyviä radan alus- ja pohjarakenteiden suunnittelukriteereitä ovat radan alusrakenneluokka, joka määräytyy mitoitusnopeuden ja junakuormien mukaan sekä radan sallitut painumat, jotka puolestaan liittyvät radan alusrakenneluokkaan. Muut radan alus- ja pohjarakenteiden suunnittelukriteerit kuten radan vakavuus, routamitoitus ja pengerleveyden mitoitus liittyvät paalulaatan osalta sen geotekniseen mitoitukseen.

#### Alusrakenneluokat

Radat jaetaan viiteen alusrakenneluokkaan. Alusrakenneluokan määrää joko henkilöliikenne tai tavaraliikenne riippuen siitä, kumman vaatimustaso on korkeampi. /6/ Taulukossa 3.1 on esitetty julkaisun: Ratatekniset määräykset ja ohjeet, osa 3 eli RAMO 3, mukaiset radan alusrakenneluokat.

Taulukko 3.1. Radan alusrakenneluokat. /6/

Alusrakenne-Luokka	Henkilöliikenteen suurin sallittu nopeus, v [km/h]	Tavaraliikenteen suurin sallittu nopeus 22,5 t akseli-painolla, v [km/h]	Tavaraliikenteen suurin sallittu nopeus 25 t akselipainolla, v [km/h]
0	≤ 50	≤ 40	≤ 30
1	≤ 120	≤ 100	≤ 60
2	≤ 200	≤ 100	≤ 80
3	≤ 250	≤ 120	≤ 100
4	> 250	> 120	> 100

#### Ulkoiset kuormat

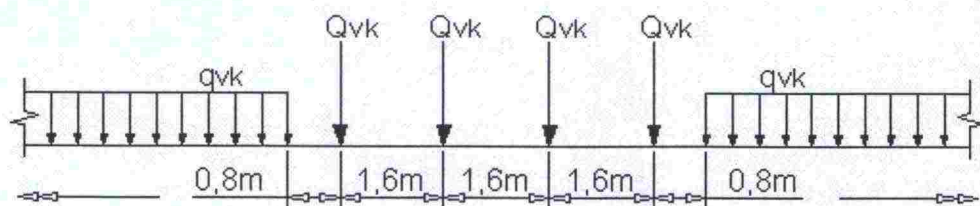
##### Junakuormat

##### Pystysuorat junakuormat

Pystysuoran junakuorman RAMO 3 määrittää seuraavasti: Radan perustamiseen sekä alus- ja pohjarakenteiden mitoituksessa käytettävä pystysuoran junakuorman ominaisarvo saadaan kertomalla Eurocode 1 mukaisen kuormakaavion LM71 perusteella määräytyvät, paikallaan olevan junan aiheut-

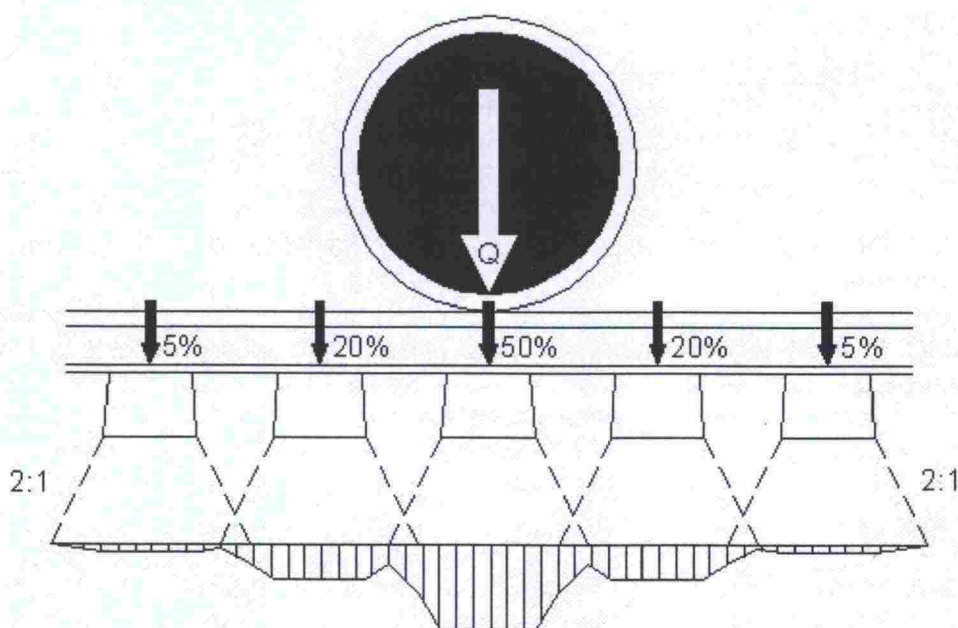
tamaa staattista kuormaa vastaavat nauha- ja akselikuormat asianomaisella sysäyskertoimella  $\Phi_v$ . Junakuorman laskenta-arvo saadaan junakuorman ominaisarvosta kertomalla se junakuorman osavarmuusluvulla. /6/

LM71 kuormakaavio muodostuu nauhakuormasta  $q_{vk}$  ja neljästä akselikuormasta  $Q_{vk}$ , jotka sijaitsevat 1,6 m etäisyydellä toisistaan. Nauhakuorma  $q_{vk}$  voi olla epäjatkuva siten, että saavutetaan määräävä kuormitustapaus. /6/ Kuormakaavio LM71 on esitetty kuvassa 3.1 ja sitä vastaavat akselipainoluokat taulukossa 3.2.



Kuva 3.1. Eurocode 1 mukainen kuormakaavio LM71. /6/

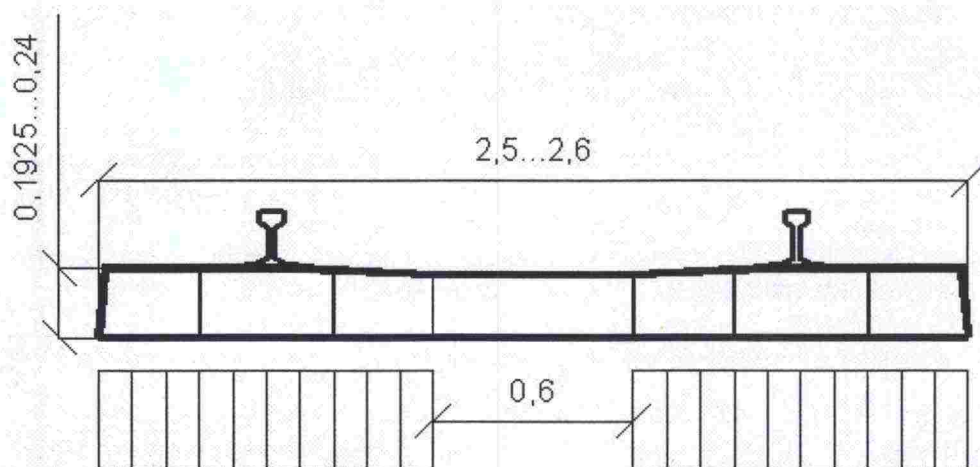
Akselikuormien jakaantuminen ratapölkkyjen kautta ratapenkereeseen voidaan otaksua kuvan 3.2 mukaiseksi.



Kuva 3.2. Pystysuoran junakuorman jakaantuminen ratapölkkyistä penkereeseen. /6/

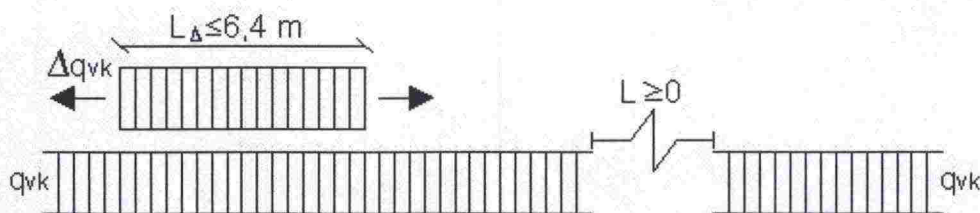
Akselikuormien jakautuminen ratapölkkyjen pituussuunnassa voidaan puolestaan Ratahallintokeskuksen julkaisun: Ratatekniset määräykset ja ohjeet, Radan päällysrakenne, mukaan olettaa kuvan 3.3 mukaiseksi.





Kuva 3.3. Kuormituksen jakautuminen ratapölkylä.

RAMO 3 mukaisesti, kun radan korkeusviivan ja tarkastelutason välinen etäisyys on suurempi kuin 0,80 m, voidaan kuormakaaviota käsitellä kuvan 3.4 ja taulukon 3.2 mukaisesti kahtena tasaisena kuormana  $q_{vk}$  ja  $\Delta q_{vk}$ .



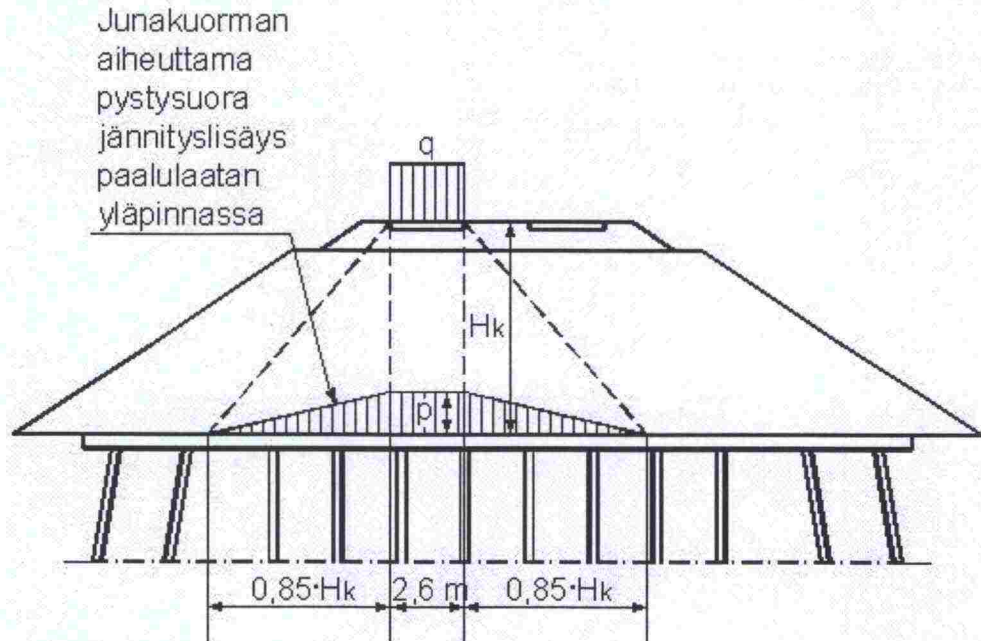
Kuva 3.4. Kuormakaavion LM71 käsittely kahtena tasaisena pinta-kuormana. /6/

RAMO 3 mukainen otaksuma junan akselikuormien jakautumisesta tasaiseksi pintakuormaksi penkereessä tasolla  $K_v -0,80 \text{ m}$ , on varsin optimistinen. Paalulaattarakenteen, jonka käyttöalue alkaa tasolta  $K_v -1,40 \text{ m}$ , suunnittelussa junakuorma voitaneen kuitenkin otaksua tasaisesti jakautuneeksi. Junan akselikuormat jakautuvat tasaisemmin tarkastelutason syvyyden kasvaessa.

Paalulaattojen osalta RAMO 3 määrittelee mitoituksessa käytettävän kuormakaavion seuraavasti: Junakuorman osalta paalulaattojen mitoituksessa valitaan määrääväksi muodostuva kuormitustapaus seuraavista vaihtoehdoista:

Nauhakuormaksi  $q$  muutettu junakuorma vaikuttaa jatkuvana. Kuorman voidaan tällöin olettaa jakautuvan ratapenkereen poikkileikkauksessa kuvan 3.5 mukaisesti.

Nauhakuormien  $q$  ja  $\Delta q$  summa vaikuttaa kuvan 3.4 mukaisesti 6,4 m matkalla. Kuorman voidaan tällöin olettaa jakautuvan sekä radan pituussuunnassa että poikkileikkauksen suunnassa kuvassa 3.5 esitetyn periaatteen mukaisesti.



q on kuormitustapausta vastaava nauhakuorma (kN/m)

H<sub>k</sub> on rakennekerrosten kokonaispaksuus (m)

p on junakuorman aiheuttama pystysuora jännityslisäys raiteen alapuolella (kPa)

Kuva 3.5. Pystysuoran junakuorman jakautuminen ratapenkereen poikkileikkauksessa. /6/

Junakuorman aiheuttama pystysuora jännityslisäys raiteen alapuolella määrittyy RAMO 3 mukaan kaavasta 3.1:

$$p = \frac{q}{2,6 + 0,85 \cdot H_k} \quad (3.1)$$

Kuvan 3.5 mukainen pystykuormituksen jakauma perustuu elementtimenettelmällä suoritettuihin tarkasteluihin. Suunnittelun selkeyttämiseksi elementtimenetelmän mukainen kuormitusjakauma on yksinkertaistettu kaavaa 3.1 vastaavaksi, reuna-alueiltaan suoraviivaisesti laskevaksi kuormitusjakaumaksi.

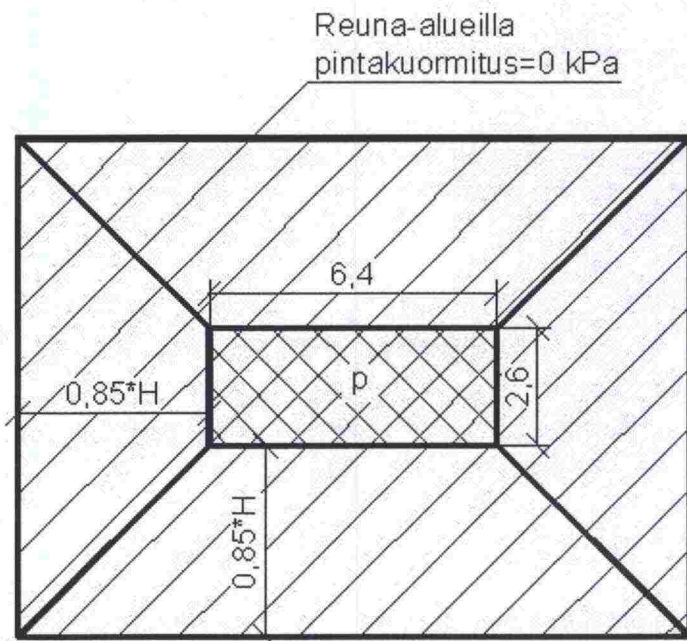
Kuvassa 3.5 esitetyn junakuorman kuormitusjakauma poikkeaa olennaisesti Tiehallinnon julkaisussa: Paalulaattojen ja paaluhattarakenteiden suunnitteluohje, esitetystä liikennekuorman 2:1 jakaumasta. Noin 1,18:1 kuormitusjakauman laatan pintaan aiheuttama pystysuorakuormitus ulottuu 2:1 kuormajakaumaa laaja-alaisempana myös laatan reuna-alueille. Pystykuormitus suoraan pölkyn alla on puolestaan kuormitusjakaumaa 2:1 käytettäessä suurempi.

RAMO 3 mukaan pystysuoran junakuorman jakautuminen nauhakuormitusten q ja Δq summan vaikuttaessa 6,4 m matkalla lasketaan kuvassa 3.5 esitetyn periaatteen mukaan. Pystykuormitusten summan ratapenkereen päällä on tällöin oltava sama kuin pystykuormitusten summa tarkastelutason



pinnassa. Pystykuormituksen yhtä suuruus voidaan näin ollen esittää yhtälön 3.2 mukaisesti. Kuormituksen jakaumaa tarkastelutason pinnassa havainnollistetaan kuvan 3.6 avulla.

$$p \cdot \left[ \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot 0,85 \cdot H_k)^2 + 6,4 \cdot 2,6 + 6,4 \cdot 0,85 \cdot H_k + 2,6 \cdot 0,85 \cdot H_k \right] = 6,4 \cdot (q + \Delta q) \quad (3.2)$$



Kuva 3.6. Nauhakuormien  $q$  ja  $\Delta q$  summan jakautuminen penkereessä tasokuvana.

Yhtälö 3.2 voidaan edelleen esittää kaavan 3.3 muodossa, joka vastaa kuvan 3.5 mukaisen kuormitusjakauman aiheuttamaa pystyjännitystä tarkastelutasossa suoraan ratapölkkyjen alla junakuormituksen ollessa nauhakuormien  $q$  ja  $\Delta q$  summa.

$$p = \frac{6,4 \cdot (q + \Delta q)}{\left[ \frac{1}{3} \cdot (1,7 \cdot H_k)^2 + 7,65 \cdot H_k + 16,64 \right]} \quad (3.3)$$

Suunnittelussa käytettävän mitoitussakselipainon RAMO 3 määrittelee seuraavasti: Uusien ratojen suunnittelussa käytetään taulukon 3.2 mukaista 35 t mitoitussakselipainoa, ellei hankkeen suunnitteluperiaatteissa muuta esitetä. Radan parantamisen yhteydessä käytetään 35 t mitoitussakselipainoa rakenteille, joiden suunniteltu käyttöikä on 100 vuotta, ellei hankkeen suunnitteluperiaatteissa muuta esitetä. Muilta osin radan parantamisen yhteydessä noudatetaan hankkeen suunnitteluperusteissa määritettyä mitoitussakselipainoa. Olemassa olevien ratojen suunnittelussa käytetään rataosan mitoitussakselipainoa. /6/

*Taulukko 3.2. Kuormakaavion LM71 mitoitusakselipainot, niiden tunnuksset sekä vastaavat staattiset nauhakuormien ja akselikuormien arvot. /6/*

Mitoitus- akselipaino [t]	Kuorma- kaavion tunnus	Kuorma- kaavion $\alpha$ -kerroin	Kuorma- kaavion nauha- kuorma, $q_{vk}$ [kN/m]	$\Delta q_{vk}$ [kN/m]	Kuorma- kaavion akseli- kuormat, $Q_{vk}$ [kN]
17	LM71-17	0,75	60	58	188
22,5	LM71-22,5	1,00	80	76	250
25	LM71-25	1,10	88	84	275
30	LM71-30	1,33	106	102	333
35	LM71-35	1,46	120	111	370

Taulukossa 3.2 esitetty kerroin  $\alpha$  kuvaa tarkasteltavan mitoitusakselipainon aiheuttamien kuormitusten suhdetta, Eurocode 1, mukaisen normaalin liikenteen aiheuttamiin kuormituksiin. Normaalia liikennettä kuvaa näin ollen mitoitus akselipaino 22,5 t, jonka  $\alpha$ -kerroin on 1,00.

Paalulaattarakenteiden suunnittelussa käytettäviä kuormituksia RAMO 3 tarkentaa seuraavasti: Paalulaattojen, rautatiesiltojen ja siltamaisten erikoisrakenteiden kuormat ja osavarmuusluvut on esitetty julkaisussa, Rautatiesiltojen suunnitteluohje (RSO). /6/

Radan maanvaraisen perustamisen sekä alus- ja pohjarakenteiden mitoituksessa käytettävä pystysuoran junakuorman ominaisarvo saadaan kertomalla Eurocode 1 mukaisen kuormakaavion LM71 perusteella määräytyvät, paikallaan olevan junan aiheuttamaa staattista kuormaa vastaavat nauha- ja akselikuormat asianomaisella sysäyskertoimella  $\Phi_v$ . /6/

Suunnittelussa käytettävän sysäyskertoimen  $\Phi_v$  RAMO 3 määrittää seuraavasti: Junakuorman pystysuoran lisäkuorman laskemisessa sysäyskertoimelle käytetään uusia ratoja suunniteltaessa vakioarvoa  $\Phi_v=1,25$ . /6/ Tällöin junakuorman pystysuoran lisäkuorman vaikutus on 25 % pystysuorasta junakuormasta tarkastelusyvydestä riippumatta.

### Vaakasuorat junakuormat

#### Pituussuuntainen lisäkuorma

Pituussuuntaisella lisäkuormalla tarkoitetaan junan kiihdytyksen ja jarrutuksen aiheuttamia ominaiskuormia. Pituussuuntainen lisäkuorma vaikuttaa kiskon selän korkeudella ja sen suuruus riippuu paalulaatan pituudesta, kiskotuksesta ja mitoittavasta junakuormasta. Junakuorman pituussuuntainen lisäkuorma lasketaan prosentteina paalulaattaa kuormittavasta pystysuorasta junakuormasta, taulukon 3.3 mukaisesti.



*Taulukko 3.3. Junakuorman pituussuuntainen lisäkuorma prosentteina sillan pystysuorasta junakuormasta. /8/*

I	Sillalla on pysyvästi jatkuvaksi hitsattu raide, joka ulottuu sillan päiden ohitse riittävän pitkän matkan (50 m)	$28 - \frac{1180}{L + 14} \geq 15\%$
II	a) Sillalla on pysyvästi jatkuvaksi hitsattu raide, joka ulottuu sillan toisen pään ohitse riittävän pitkän matkan (50 m) ja sillan toisessa päässä on kiskonliikuntalaite. b) Sillalla on normaalein kiskoatkoksien jatkettu kiskotus ns. lyhytkiskoraide.	$28 - \frac{590}{L + 14} \geq 15\%$
III	Sillalla on molemmissa päissä kiskonliikuntalaite	28%

Taulukko 3.3 kuvaa siltojen suunnittelussa käytettävän pituussuuntaisen lisäkuorman osuutta pystysuorasta junakuormasta. Näin saatavaa pituussuuntaista lisäkuormaa voidaan käyttää myös paalulaattarakenteita suunniteltaessa. Kyseisessä taulukossa on sillan pituutta merkitty kirjaimella L (m) ja sen arvoksi otetaan sillan kannen pituus /8/.

Useamman raiteen paalulaatoilla käytetään taulukon 3.4 antamia pituussuuntaisen lisäkuorman arvoja.

*Taulukko 3.4. Pituussuuntainen lisäkuorma moniraiteisilla silloilla. Taulukon arvot ovat prosentteina yhden raiteen pituussuuntaisesta lisäkuormasta. /8/*

	Kiihdytys- ja jarrutusalueella	Muualla kuin kiihdytys- ja jarrutusalueella
Ensimmäinen raide	100	100
Toinen raide	100	60
Kolmas ja sitä seuraavat raiteet	40	40

Ratahallintokeskuksen julkaisun: Oikorata Kerava-Lahti, Paalulaattojen suunnittelu- ja rakentamisohje, mukaan kohteeseen suunniteltuja tyyppipaalulaattoja käytettäessä pituussuuntainen lisäkuorma määritetään pitkän laattajonon osalta seuraavasti: Yhdeltä raiteelta oletetaan tyyppilaattasuunnitelmassa kehittyvän vaakakuormaa 28 % pystysuorasta junakuormasta. Toisen raiteen vaikutuksesta otetaan huomioon 60 %. /5/

### Junakuorman sivusuuntainen lisäkuorma

Raiteiden ja junan pyörien sisäpinnan välissä täytyy liikennöimisen mahdollistamiseksi olla liikuntasauva. Liikkeessä oleva juna pyrkii liikuntasauvojen rajaamalla alueella liikkumaan poikkisuunnassa raiteita vastaan. Aaltoileva, sinikäyrää muistuttava liike aiheuttaa raiteeseen ja edelleen penkereeseen sekä penkereen alaiseen paalulaattaan kohdistuvan junan sivusuuntaisen lisäkuorman.

Julkaisussa: Oikorata Kerava-Lahti, Paalulaattojen suunnittelu- ja rakentamisohje, junakuorman sivusuuntainen lisäkuorma huomioidaan seuraavasti. Keskitetty 146 kN kuorma on jaettu metrikuormaksi liikuntasaumavälille  $L=40$  m. Toisella raiteella voiman ei oleteta vaikuttavan yhtä aikaa. /5/

### Keskipakovoima

RAMO 3 määrittää junan aiheuttamat vaakakuormat seuraavasti: Junasta aiheutuvan keskipakovoiman vaikutus on otettava huomioon laskettaessa kaarteessa sijaitsevan radan stabiiliteettia ulkokaarten puolella. /6/ Paalulaattarakenteissa keskipakovoima huomioidaan paalulaattaa ja paaluja kuormittavana vaakakuormituksena.

Keskipakovoiman Ratahallintokeskuksen julkaisu: Rautatiesiltojen kuormat (RSO 2), kuvaa seuraavalla tavalla: Junakuorman keskipakokuorma kuvaa kaarteessa liikkuvan junan aiheuttamat ominaiskuormat. Keskipakokuorma vaikuttaa 2 m kiskon selästä. Keskipakokuorma  $F$  on rakennetta kuormittavan, kuormakaaviosta LM71 lasketun, pystykuorman  $P$  (kN) (ilman sysäyslisää), kaarresäteen,  $R$  (m) ja rataosan tavoitenopeuden  $v$  (m/s) funktio. /8/ Keskipakovoima lasketaan kaavasta 3.4.

$$F = P \cdot \frac{v^2}{9,81 \cdot R} \quad (3.4)$$

Mikäli silta on siirtymäkaaren alueella, valitaan  $R$  siirtymäkaaren alussa  $R=3 \cdot R_0$ , missä  $R_0$  on kyseisen kaaren kaarevuussäde. Kaarevuuden väliarvot interpoloidaan näistä siirtymäkaaren päiden arvoista. /8/

### Tuulikuorma

Rataan ja junaan kohdistuva poikittainen tuulikuorma on alueellisesti ja paikallisesti hyvin vaihteleva. Tuulikuormaa, joka yleisesti määriteltynä on tuulen nopeuspaineen  $q$  (kN/m<sup>2</sup>) ja voimakertoimen  $C_F$  funktio käsitellään yksityiskohtaisesti esimerkiksi julkaisussa: RIL 144-1997, Rakenteiden kuormitusohjeet.

Tuulikuormaa mitoitettaessa otaksutaan junan vastaavan suorakaiteen muotoista pintaa, jonka korkeus on 5 metriä kiskon selästä. /8/

Esimerkiksi Oikorata Kerava-Lahti tyyppipaalulaattojen suunnittelussa käytetty tuulikuorma on 8 kN/m.

### Työkonekuormat

Paalulaattarakenteiden suunnittelussa käytetyn työkonekuorman RAMO 3 määrittää seuraavasti: Rakentamisen aikaisissa tilanteissa työkonekuorman ominaisarvoksi on otaksuttava vähintään 10 kPa suuruisia tasaista pinta-kuormaa vastaava kuorma. Laaja-alaisena vaikuttavien työkonekuormien suuruus on kuitenkin arvioitava tapauskohtaisesti erikseen. Raskaiden työkoneiden osalta – esimerkiksi raskaat autonosturit, kaivinpaalukoneet,

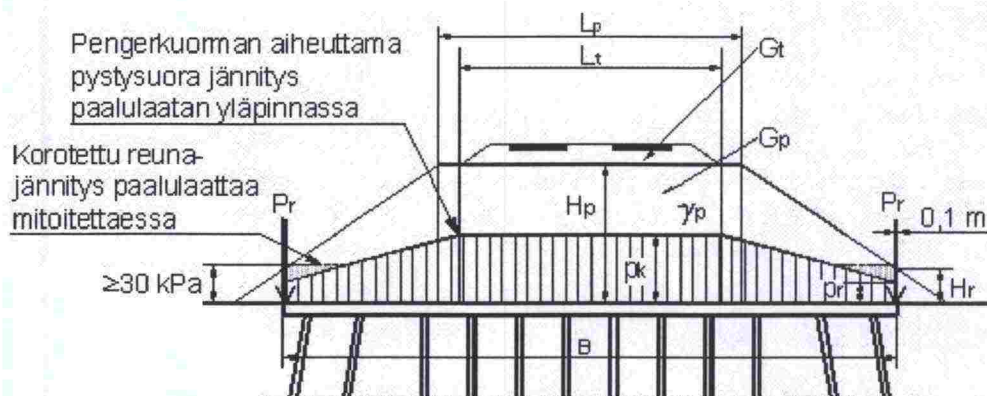


dumpperit ja raskaat paalutuskoneet – työkuorman suuruus on myös arvioitava tapauskohtaisesti erikseen. Suuntaviivoja tähän on annettu esimerkiksi Tiehallinnon julkaisussa: Teiden pohjarakenteiden suunnittelu-  
rusteet. /6/ Julkaisun: Teiden pohjarakenteiden suunnittelu-  
rusteet, mukaiset työkuormat on esitetty kappaleessa 3.2.1.

## Pengerkuormat

### Penkereen painosta aiheutuvan pystysuora kuorma

Penkereen painosta aiheutuvan pystysuoran kuorman jakautuminen oletetaan kuvan 3.7 mukaiseksi.



$L_p$  on pengerleveys (m)

$L_t$  on tukikerroksen alapinnan leveys (m)

$G_p$  on alusrakenteen ja mahdollisen pengertäytteen kokonaispaino (kN/m)

$G_t$  on tukikerroksen, pölkkyjen ja kiskojen paino (kN/m)

$G$  on laatan päällä olevan ratapengerin kokonaispaino (kN/m)

$H_p$  on alusrakennekerrosten ja mahdollisen pengertäytteen paksuus (m)

$H_r$  on alusrakennekerrosten ja mahdollisen pengertäytteen paksuus

paalulaatan reunan kohdalla (m)

$B$  on paalulaatan leveys (m)

$p_k$  on pengerkuorman aiheuttama pintakuorma laatan keskiosalla (kN/m<sup>2</sup>)

$p_r$  on pengerkuorman aiheuttama pintakuorma laatan reunalla (kN/m<sup>2</sup>)

$P_r$  on laatan reunalla vaikuttava viivakuorma (kN/m)

$\gamma_p$  on pengermateriaalin tilavuuspaino (kN/m<sup>3</sup>)

Kuva 3.7. Penkereen painosta aiheutuvan pystysuoran kuorman ja-  
kautuminen. /6/

Alusrakenteen ja mahdollisen pengertäytteen kokonaispaino  $G_p$  lasketaan RAMO 3 mukaan kaavasta 3.5.

$$G_p = [(L_p + 1,5 \cdot H_p) \cdot H_p - 1,5 \cdot H_r^2] \cdot \gamma_p \quad (3.5)$$

Laatan päällä olevan ratapengerin kokonaispaino puolestaan lasketaan kaavasta 3.6.

$$G = G_t + G_p \quad (3.6)$$

Pengerkuorman aiheuttama pystysuora jännitys laatan reunalla  $p_r$  ja keskiosalla  $p_k$  saadaan nyt kaavoista 3.7 ja 3.8.

$$p_r = 1,0 \cdot H_r \gamma_p \quad (3.7)$$

$$p_k = \frac{2 \cdot G - (B - L_t) \cdot p_r}{B + L_t} \quad (3.8)$$

Kuvassa 3.7 esitettyä reunajännityksen korotusta RAMO 3 tarkentaa seuraavasti: Reunajännityksen korotuksella otetaan huomioon enintään 1,0 m laatan yläpuolelle ulottuva huoltotie sekä tavanomaiset, 10 kPa suuruista tassaista pintakuormaa vastaavat, työkonekuormat huoltotiellä ja penkereellä. Mahdolliset sivulta tehtävät ajorampit penkereen päälle on kuitenkin suunniteltava erikseen. Laatan reunalla vaikuttava viivakuorma  $P_r$  on myös arvioitava tapauskohtaisesti erikseen. /6/

Maanpaine lasketaan soveltaen Tiehallinnon julkaisun: Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet, kappaletta 7.2.6. /6/

Julkaisu: Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet, määrittää suunnittelussa käytettävän maanpainon seuraavasti: Täyttömaan painon ominaisarvona voidaan yleissuunnittelussa yleensä käyttää 20 kN/m<sup>3</sup>. Tapauksissa, joissa tiivis maa voi kyllästyä vedellä tai kyseessä on hyvin tiivistetty tien päällysrakenne, paino on yleensä suurempi kuin 20 kN/m<sup>3</sup>. Sillan taustatäytöissä, kun lasketaan siltaan kohdistuvia kuormia, käytetään täyttömateriaalin tilavuuspainona  $\gamma=21$  kN/m<sup>3</sup>. /21/

Rakenneosien painoksi (RSO 2) suosittaa taulukon 3.5 mukaisia rakenteiden keskimääräisiä tilavuuspainoja.

*Taulukko 3.5. Tilavuuspainot rautatiesilloissa. /8/*

Betoni, raudoitettu	25 kN/m <sup>3</sup>
Betoni, raudoittamaton	24 kN/m <sup>3</sup>
Teräs	77 kN/m <sup>3</sup>
Sepeli	18 kN/m <sup>3</sup>
Pengertäyte	20 kN/m <sup>3</sup>

Lisäksi pengerkuormia laskettaessa voidaan käyttää seuraavia taulukossa 3.6 esitettyjä rakenneosien metrikuormia.

*Taulukko 3.6. Metrikuormat rautatiesilloissa. /8/*

Suojakiskot	1,5 kN/m
Yhden raiteen päällysrakenne suoralla radalla (sepeli, pölkyt ja kiskot)	46 kN/m

### Maanpaine

RAMO 3 mukaan radan alus- ja pohjarakenteita mitoitettaessa pitää myös tapauskohtaisesti määriytyvät rakenteita kuormittavat tekijät, kuten ratapen-



kereen sisäisestä maanpaineesta paaluperustuksille ja paalulaatoille aiheutuvat vaakakuormat huomioida. /6/ Vaakasuora maanpaine voidaan laskea esimerkiksi kappaleessa 3.2.1 esitetyn periaattein.

Julkaisun: Oikorata Kerava-Lahti, Paalulaattojen suunnittelu- ja rakentaminen, määritelmä maanpaineen huomioimiselle paalulaattoja suunniteltaessa on puolestaan seuraava: Tyyppilaattasuunnitelmissa ei ole otettu huomioon Tiehallinnon julkaisun, Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnitteluohje, kohdassa 4.2.3 esitettyä toispuoleista maanpainetta poikkisuunnassa, eikä pituussuuntaista maanpainekuormaa. Liittymisessä siltaan on erikseen tarkasteltava sillalta tulevien pituussuuntaisten vaaka- ja pystykuormien suuruus ja vaikutus paalulaataan. Maanpaineen vaikutus voidaan ottaa vastaan paalujen kaltevuuksia muuntelemalla. /5/

Edellä mainitulla toispuoleisella maanpaineella poikkisuunnassa tarkoitetaan esimerkiksi vanhan paalulaatan viereen rakennetun uuden paalulaatan tälle aiheuttamaa vaakakuormitusta.

### Radan painumat

Paalulaattarakenteiden käyttöalue määräytyy osaltaan radan alusrakenneluokkaan liittyvien muodonmuutoskriteerien suhteen. RAMO 3 mukaiset radan pysyvän, tasaisen kokonaispainuman sekä pituus- ja sivuttaiskaltevuuden muutoksen enimmäisarvot on esitetty taulukossa 3.7.

*Taulukko 3.7. Tasaisen kokonaispainuman sekä pituus- ja sivuttaiskaltevuuden muutoksen enimmäisarvot. /6/*

Radan alusrakenneluokka	Painuma-Aika 100 vuotta	Painuma-aika 0...2 vuotta		Painuma-aika 2...9 vuotta	
	Tasainen Kokonais-Painuma [mm]	Pituus-kaltevuuden muutos [%]	Sivuttais-kaltevuuden muutos [%]	Pituus-kaltevuuden muutos [%]	Sivuttais-kaltevuuden muutos [%]
0	800	0,4	0,8	0,4	0,8
1	800	0,3	0,6	0,3	0,6
2	500	0,2	0,4	0,2	0,4
3	300	0,15	0,3	0,15	0,3
4	100	0,1	0,2	0,1	0,2

Kun oletetaan painuma ajan suhteen vakioksi, saadaan taulukon 3.7 mukaisilla pituuskaltevuuden muutoksilla siirtymärakenteen pituudeksi taulukon 3.8 mukaiset vähimmäispituudet.

*Taulukko 3.8. Siirtymäarakenteiden vähimmäispituudet radoilla.*

Radan alusrakenneluokka	Siirtymärakenteen vähimmäispituus (m)
0	10
1	20
2	25
3	27
4	20

### 3.1.2 Nopea liikenne

Junaliikenteen kehittyessä entistä nopeampi henkilöjunaliikenne ja sen asettamat vaatimukset ovat usein lähtökohtina radan suunnittelussa. Junan mitoitussnopeus, joka henkilöjunaliikenteen osalta määrittää käytettävän alusrakenneluokan, vaikuttaa edelleen radan sallittuihin muodonmuutoksiin. Alusrakenneluokka voi määräytyä myös tavaraliikenteen mukaan, mikäli se antaa taulukon 3.1 mukaan henkilöjunaliikennettä määräävämmän vaikutuksen. Sallitut muodonmuutokset puolestaan lopulta määräävät ratapenkereen teknillistaloudellisesti edullisimman perustamismenetelmän. Edullisin tekniset vaatimukset täyttävä perustamismenetelmä saavutetaan vertailemalla kattaviin pohjatutkimuksiin perustuvien, yleisesti hyväksyttyjen geoteknisten laskentamenetelmien tuloksia eri perustusmenetelmien välillä. Perustamisen kannalta hankalilla pehmeikköalueilla on paalulaattarakenne rakenteen koko elinkaaren tekniset vaatimukset täyttävistä perustamismenetelmistä usein edullisin ratkaisu.

Käytettäessä paalulaattarakennettä nopeasti liikennöidyillä radoilla, on huomioitava erityisesti junakuorman luonne. Dynaamiset ja syklist kuormitukset voivat saada penkereen alaisen hoikan paalulaatan värähtelemään. Tällöin paalulaatta pitää mitoitaa siten, että sen dynaaminen jäykkyys on riittävä kuormituksen aiheuttamaan syklisyyteen nähden. Muussa tapauksessa rakenne on mitoitettava väsytyskuormille.

Esimerkkinä nykypäivän nopealle junaliikenteelle suunnitelluista rautateistä voidaan pitää entistä nopeamman, kaksi raiteisen radan rakentamista Kera- van ja Lahden välille. Kohteen paalulaattarakenteiden käyttöalueet määräytyvät julkaisun: Oikorata Kerava-Lahti, Paalulaattojen suunnittelu- ja rakentamisohje, mukaan pohjasuhteiden osalta seuraavasti:

- Tiehallinnon julkaisun: Paalulaattojen ja paaluhattarakenteiden suunnitteluohje, teksti voimassa
- Tyypilaaattaa sovelletaan kohteissa, joissa saven suljettu leikkauslujuus on vähintään 10 kPa
- Jos saven leikkauslujuus on vähintään 2 metrin paksuudella < 10 kPa tai kyseessä on turve- tai liejupehmeikkö, niin suunnitelmaa on tarkistettava vastaamaan olosuhteita

Tyypilaaatat, joihin pohjamaan leikkauslujuuden vaatimukset liittyvät on tarkoitettu yhdenmukaistamaan ja helpottamaan suuri mittakaavaisen ratahankkeen suunnittelutöitä. Tiehallinnon julkaisun: Paalulaattojen ja paaluhat-



turakenteiden suunnitteluohje, mukaiset paalulaattarakenteen käyttöalueet on esitetty kappaleessa 2.1.

Edellä esitetyistä paalulaattarakenteiden mitoitusperiaatteista poiketen hankkeen Oikorata Kerava – Lahti ratarakenteet on mitoitettu kuormakaaville LM71-30 eli 30 tonnin akselipainolle.

### 3.1.3 Hidas liikenne

Hitaasti liikennöidyiksi raiteiksi tai rataosuuksiksi voidaan katsoa ratapihat, vaihteet, väistöraiteet sekä erilaiset teollisuusraiteet. Näiden raiteiden tai rataosuuksien alusrakenneluokan ja sitä kautta sallitut muodonmuutokset määräytyvät usein tavarajunien akselipainojen mukaan. Junaliikenteen nopeudesta aiheutuvan dynaamisen kuormituksen osuus on hitaasti liikennöidyillä radoilla mitoituksen kannalta usein merkityksetön.

Hitaasti liikennöidyillä radoilla paalulaattarakenteen käyttö perustuu kuten nopeasti liikennöidyillä osuuksillakin radan sallittuihin muodonmuutoksiin. Paalulaattarakenteen käyttö on perusteltua, kun tälle vaihtoehtoisilla perustusmenetelmillä ei saavuteta teknisesti toimivaa ratkaisua tai kun rakennuskustannuksiltaan vaihtoehtoisia perustusmenetelmiä kalliimpi paalulaattarakenne on rakenteen elinkaarikustannuksia ajatellen edullisempi.

Myös paalulaattarakennetta edullisemmaksi vaihtoehdoksi muodostuva, Ratahallintokeskuksen julkaisussa: RMYTL 3, Perustamis- ja vahvistamismenetelmät, esitetty kolmen paalun elementtilaatta on hitaasti liikennöidyillä radoilla varsin käytetty. Kolmen paalun elementtilaatan käytöstä on nykyisin kuitenkin luovuttu ja korvattu se teknisesti toimivammalla neljän paalun elementtilaatala. Julkisten radanrakennushankkeiden osalta paaluhatturakenteen käyttö on lopetettu.

## 3.2 Tiet

### 3.2.1 Käyttöalueiden määräytyminen

Tierakenteissa paalulaattarakenteiden käyttöalueet määräytyvät niin pohjasuhteiden kuin sallittujen muodonmuutosten suhteen. Koska liikennekuormitus on tierakenteissa yleensä sama ja tieluokasta riippumaton, ei sillä katsota olevan samanlaista merkitystä paalulaattarakenteiden käyttöalueisiin kuin junakuormilla radan suunnittelussa. Tällöin liikennekuorma voidaan katsoa lähinnä suunnittelun lähtötiedoksi, pohjasuhteiden määrittäessä paalulaatan käyttöalueen. Ainoastaan erikoisraskaille kuljetuksille suunnitelluilla väylillä voivat kuormitukset paalulaattarakennetta suunniteltaessa olla yleisesti käytettyjä kuormituksia suurempia.

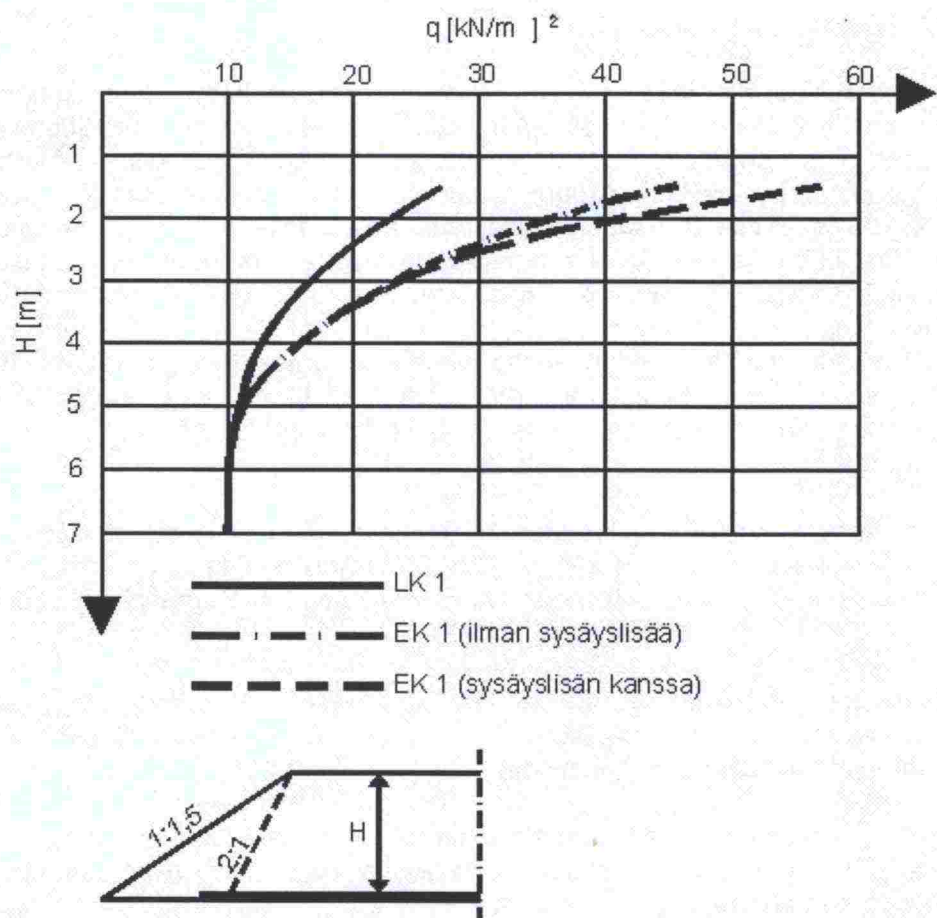
Tiehallinnon julkaisun, Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnitteluohje, mukaiset paalulaattarakenteiden käyttöalueet on esitetty kappaleessa 2.1. Varsinaista pohjamaan leikkauslujuuden vaihteluväliä eivät Tiehallinnon paalulaattoja koskevat ohjeet kuitenkaan määritä. Tällöin pohjamaan leikkauslujuuden minimiarvon määrittää käytännössä paalutuksen toteutettavuus sekä paalulaatan valualustan painumakriteeri.

Leikkauslujuuden ylärajaa on vaikea määrittää. Ylärajana voidaan pitää esimerkiksi paalulaattarakenteelle vaihtoehtoisen paaluhatturakenteen käyttöalueen vähimmäisleikkauslujuutta. Paaluhatturakenteilla pohjamaan leikkauslujuuden vähimmäisarvo on normaali penkereen osalta 15 kPa ja sillan taustapenkereen osalta 20 kPa. Paaluhatturakenteita käytettäessä on kuitenkin muistettava sen huono toimivuus dynaamisten kuormitusten alaisena. Paalulaattarakennetta voidaan käyttää myös edellä mainittuja arvoja korkeammilla leikkauslujuuksilla, mikäli se on elinkaarimitoituksen kannalta perusteltua.

### Pystysuorat kuormat

#### Liikennekuorma

Tiehallinnon julkaisu, Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnitteluohje, määrittää paalulaattojen mitoituksessa käytettävän liikennekuormituksen seuraavasti: Liikennekuormat (Lk1 ja Ek1) otetaan huomioon paalulaatta- tai paaluhatturakenteen yläpinnassa vaikuttavana tasaisena pystykuormana kuvan 3.8 mukaisesti. Kuorma vaikuttaa tieluiskan yläreunasta ulospäin kaltevuudessa 2:1 vedettyjen suorien sisään jäävällä alueella. /18/ Lyhenne Lk 1 tarkoittaa liikennekuorma 1 ja Ek 1 erikoiskuorma 1.



Kuva 3.8. Liikennekuorman syvyydessä  $H$  aiheuttama tasainen kuorma. /18/



Yli 6 m korkeilla penkereillä ja alueilla, joille voi kohdistua satunnaista liikennekuormaa, kuten moottoritien keskikaista, liikennekuormasta aiheutuvan pintakuorman ominaisarvo on vähintään  $10 \text{ kN/m}^2$ . Työn aikaiset kuormitukset, kuten liikkuminen keskeneräisen rakenteen päällä, on otettava erikseen huomioon. /21/

Kuvan 3.8 mukainen tasainen pystykuormitus ei yleisestä käytöstään huolimatta sovellu paalulaatan voimasuureiden ratkaisemiseen. Korkeilla penkereillä edellä esitetyt tasaiset pystykuormat johtavat laatan ylityöskäytökseen. Matalan penkereen osalta voivat kuvan 3.8 mukaiset tasaiset pystykuormitukset puolestaan olla todellisia, jäljempänä esitettäviin kuormakaavioihin perustuvia kuormituksia pienempiä. Tällöin laatta tulee alityöskäytetyksi. Paalulaattaa mitoittaessa pitäisi liikennekuorman aiheuttamaa, laatan pinnassa vaikuttavaa pystykuormitusta tutkia aina tarkemmin kuormakaavioihin ja kuormien todelliseen jakaumaan perustuvaa menetelmää käyttäen. Tähän soveltuu esimerkiksi elementtimenetelmä (FEM). Kuvan 3.8 mukaisia tasaisia pystykuormituksia voidaan käyttää paalulaattarakenteen paalukuormia laskettaessa.

Liikennekuormien määräytymistä paalulaattarakenteita mitoittaessa Tiehallinnon julkaisu: Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet, tarkentaa seuraavasti: Siltojen sekä muiden tierakenteisiin liittyvien betoni- ja teräsrakenteiden suunnittelussa sovelletaan julkaisussa: Siltojen kuormat TIEL, esitettyjä liikennekuormituksia. /21/

Kun liikennekuorman jakaantumista tahdotaan paalulaattarakenteita suunniteltaessa tutkia tarkemmin, käytetään suunnittelussa siltojen suunnittelusta poiketen aina kuormaluokkaa I. Luvanvaraisiin erikoiskuljetuksiin varaudutaan tarkistamalla rakenne kuormakaavioille raskas erikoiskuorma 1. Tapauskohtaisesti voidaan määrätä käytettäväksi edellä mainittuja liikennekuormia suurempia ylitähtiä suunnittelukuormia. Kuormaluokassa I paalulaatta mitoittetaan 75 tonnin kokonaispainolle.

Paalulaattarakenteita suunniteltaessa ajoneuvokuorma sysäyksistä aiheutuva lisäys mukaan luettuna, määritetään käyttäen kuormakaavioita 1 tai 2. Paalulaattarakenne mitoittetaan sille kaavioille, jotka antavat määrävien vaikutuksen.

Kuormakaavioiden 1 ja 2 oletetaan kuormittavan tien pituussuuntaista pintaa, kuormakaistaa, jonka leveys on 3 m. Kuormakaistojen lukumäärä ja sijoitus tien poikkisuunnassa valitaan siten, että saavutetaan määrävä vaikutus.

Kuormakaistojen lukumäärä on enintään se määrä, mikä mahtuu alueelle, minne ajoneuvoilla on pääsy (ajorata ja pientareet). Akselikuormilla kuormitetaan enintään kaksi kuormakaistaa. /23/

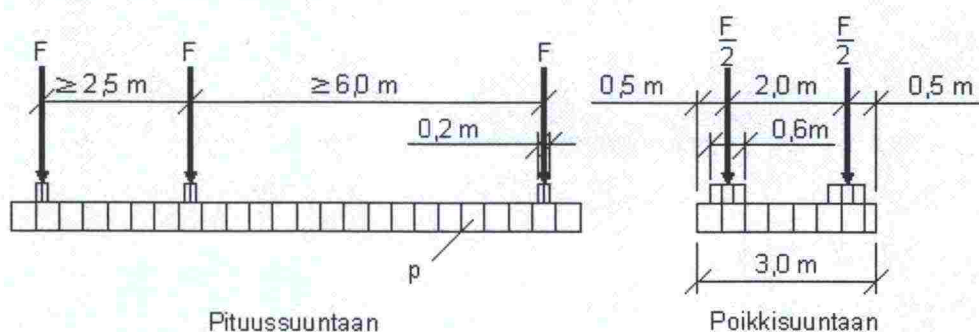
Erityisten raskaiden ajoneuvojen aiheuttama kuorma määritetään käyttämällä lisäksi kuormakaaviota, raskas erikoiskuorma. Paalulaattarakenteita mitoittaessa samanaikaisesti raskaan erikoiskuorman 1 kanssa toista ajorataa kuormittaa kuormakaavio 1 tai 2.

Taulukossa 3.9 esitetään kuvan 3.9 kuormakaaviossa 1 käytettävät akseli- ja nauhakuormat.

Taulukko 3.9. Akselikuorman  $F$  ja nauhakuorman  $p$  suuruus kuormaluokassa I. /23/

Kuormaluokka	I
Akselikuorma $F$ (kN)	210
Nauhakuorma $p$ (kN/m)	9

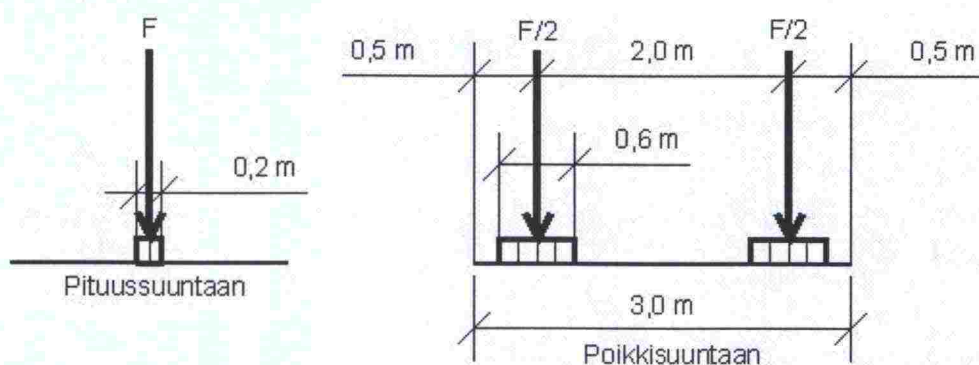
Akselikuormat muodostuvat kahdesta pyöräkuormasta, joiden keskiöväli on 2 m. Pyöräkuorman suorakaiteen muotoisen kosketuspinnan suuruus on 0,2 m ajosuunnassa ja 0,6 m kohtisuoraan tätä vastaan. Pyöräkuormat sijaitsevat keskeisesti kuormakaistassa. /23/



Kuva 3.9. Kuormituskaavio 1. /23/

Kuormakaavio 2, joka on esitetty kuvassa 3.10, käsittää yhden akselikuorman  $F$ , jonka muodostaa kaksi pyöräkuormaa, joiden keskiöväli on 2,0 m. /23/ Akselikuorman suuruus kuormaluokassa I on 260 kN.

Pyöräkuorman suorakaiteen muotoisen kosketuspinnan suuruus on 0,2 m ajosuunnassa ja 0,6 m kohtisuoraan tätä vastaan. Pyöräkuormat sijaitsevat keskeisesti kuormakaistassa. /23/



Kuva 3.10. Kuormakaavio 2. /23/

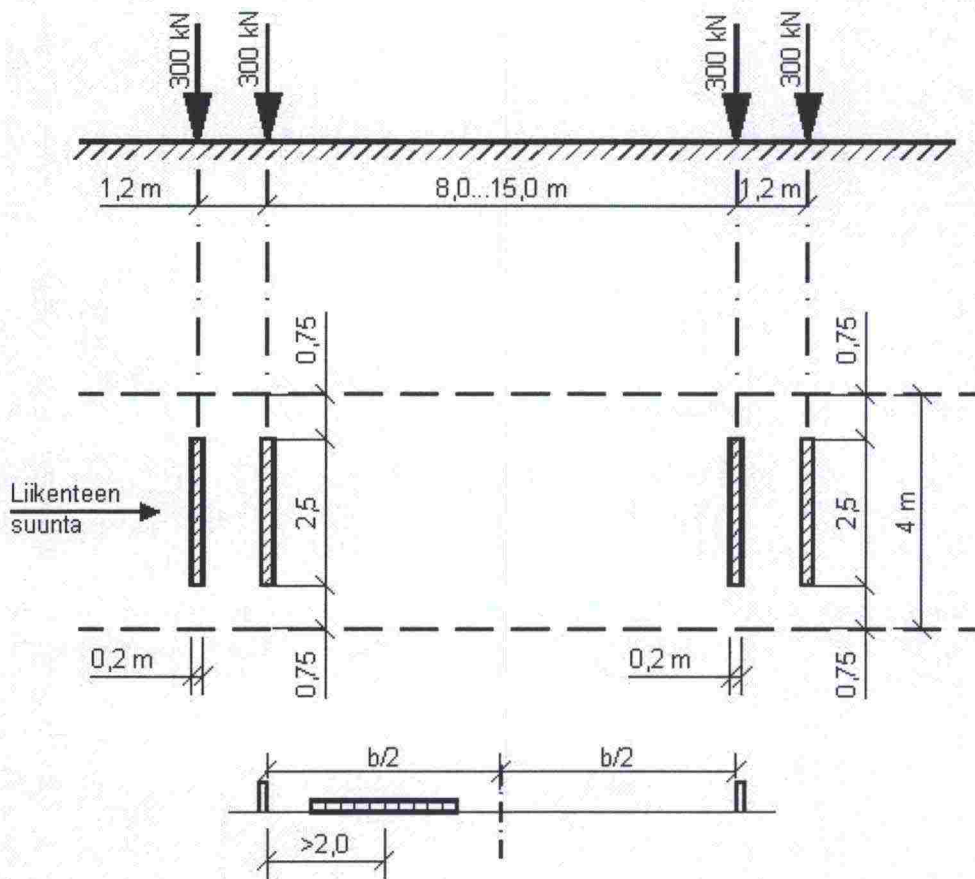
Paalulaattarakenteita suunniteltaessa määräävä kuormavaikutus saadaan yleensä kuormakaaviota 1 käyttämällä. Kuormien jakautuessa suhteessa 2:1



antaa kuormakaavio 2 määräävän vaikutuksen kuormakaavioon 1 nähden vain noin 2 metriin saakka.

Raskas erikoiskuorma on kuormaluokan I mukainen ajoneuvo, jonka kokonaisleveys on 4 m ja jonka akselistot muodostuvat kahdesta akselistä eli telistä. Ajoneuvon otaksutaan kulkevan siten, että sen keskilinjän etäisyys ajoradan reunasta on  $\geq 2,0$  m.

Julkaisun: Siltojen kuormat, mukaan sysäyksistä ja tärinästä johtuva pysytysuora lisäkuorma otetaan huomioon raskaan erikoiskuorman lisäyksenä seuraavasti: Rakennetta 0,5...3,0 m paksun täyterokksen välityksellä kuormitettaessa on sysäyslisän suuruus 40...0 % suoraviivaisesti interpoloiden. /23/ Kuvassa 3.11 on esitetty raskas erikoiskuorma kuormaluokassa I ilman sysäyslisää.



Kuva 3.11. Raskas erikoiskuorma 1 kuormaluokassa I (ilman sysäyslisää). /23/

## Vaakasuorat kuormat

### Jarrukuorma

Paalulaattarakenteiden suunnittelussa käytettävät vaakasuorat ulkoiset kuormat julkaisu: Paalulaattojen ja paaluhattarakenteiden suunnitteluohje, määrittelee seuraavasti: Vaakasuoria ulkoisia kuormia ovat mm. maanpaine,

toisen ajoradan penkereestä aiheutuva kuorma, sillan tulopenkereeseen pituussuunnassa vaikuttava pengerkuorma ja vaakasuorat liikennekuormat (jarrukuorma). /18/

Julkaisun: Siltojen kuormat, mukaan jarrukuorman suuruus on kuormaluokassa I 200 kN. Jarrukuorman oletetaan vaikuttavan tien pituussuunnassa ajoradan tasossa ja jakaantuvan tasaisesti koko ajoradan leveydelle.

### Sivukuorma

Julkaisun: Siltojen kuormat, mukaan ajoneuvon vinoon tapahtuvan tai epäsymmetrisen jarrutuksen, sivusysäyksen tms. aiheuttaman vaakasuoran kuorman (sivukuorma) P suuruus on 25 % edellä määritellystä jarrukuormasta.

Sivukuorman oletetaan vaikuttavan ajoradan tasossa, mielivaltaisessa kohdassa kohtisuoraan tien pituussuuntaa vastaan.

### Keskipakokuorma

Ajoneuvokuorman aiheuttaman vaakasuoran keskipakokuorman  $P_c$  oletetaan esiintyvän samanaikaisesti kuormakaavion 1 kanssa.

Tiehallinnon julkaisun, Siltojen kuormat, mukaan keskipakokuorman  $P_c$  suuruus lasketaan kaavasta 3.9. Tällöin se on suuruudeltaan kuitenkin enintään  $0,2 \cdot V$ .

$$P_c = \frac{40 \cdot V}{R} \quad (3.9)$$

Kaavassa 3.9 kerroin R on vaakasuoran kaarteeseen säde (m) ja V kuormaryhmästä ja tasaisesti jakautuneesta kuormasta aiheutuvat pystysuorat kuormat.

Julkaisun: Siltojen kuormat, mukaisesti keskipakokuorman oletetaan vaikuttavan ajoradan tasossa. Keskipakokuorman vaikutusta ei tarvitse huomioida, mikäli kaarteeseen säde  $R > 1500$  metriä. /23/

### Työkonekuormat

Työkonekuormat julkaisu: Paalulaattojen ja paaluhattarakenteiden suunnitteluohje, määrittää seuraavasti: Työnaikaiset tilanteet tutkitaan murtorajatilassa käyttäen työkoneiden pyöräkuormille osavarmuuslukua 1,8, joka sisältää tavanomaisen sysäyslisän. Työkoneiden kuormitus esimerkkejä on esitetty ohjeessa: Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet. /18/

Julkaisun: Rakenteiden kuormitusohjeet, RIL 144-2002, mukaan työkoneiden sysäyksistä ja tärinästä aiheutuva pystysuora lisäkuorma ottaa huomioon kertomalla staattisten pyöräkuormien arvot sysäyskertoimella 1,4 /14/.



Julkaisun: Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet, mukaan suunnitelmassa on esitettävä mitoituksessa käytetyt työkoneiden kuormat. /21/ Vaatimus viittaa työkonekuormien merkittävään rooliin teiden pohjarakenteita mitoittaessa. Etenkin paalulaattarakenteiden osalta voivat juuri työkonekuormat olla määräävä tekijä rakenteita mitoittaessa. Tällöin paalulaatan päälle rakennetun ohuen suojakerroksen päällä liikkuva työkone aiheuttaa paalulaatan pinnassa suuremman kuormituksen kuin valmiin rakenteen penkereen ja liikennekuorman yhteisvaikutus.

Julkaisussa: Rakenteiden kuormitusohjeet, RIL 144-2002, on esitetty tavanomaisten raskaiden työkoneiden aiheuttamat pysty- ja vaakakuormitukset. Näitä raskaampia paalulaattarakenteiden rakentamisessa käytettyjä työkooneita voivat olla esimerkiksi raskaat autonosturit, dumpperit, kaivinpaalutuskoneet tai muun raskaat paalutuskoneet.

Tavanomaisten lyöntipaalutuskoneiden painon voidaan otaksua jakautuvan koneen liikkuaessa  $5 \times 5 \text{ m}^2$  suuruiselle alueelle. Tällöin tasainen pintakuorma tasaisesti jakautuneena on noin 20 kPa. Työn aikana kuormitukseen vaikuttavat ylävaunun asento teloihin nähden, keilin vaakasijainti ja keilin kallistukset sekä järkäleen paino. Tavallisissa käyttötilanteissa telaketjun pohjapaine vaihtelee välillä 70...260 kPa. /21/

Dumppereiden suurin kokonaispaino on yleensä noin 700 kN. Kuormasta jakautuu tavallisesti noin 70 % taka-akselille, jolloin suurin akselikuorma on noin 430 kN ja suurin pyöräkuorma 215 kN. /21/

Keskitettyjen kuormien voidaan otaksua jakautuvan kaltevuudessa 2:1. /21/

## **Pengerkuormat**

### **Maanpaino ja rakenteiden oma paino**

Paalulaattojen ja paaluhattarakenteiden suunnitteluohje määrittää paalulaattarakenteiden suunnittelussa käytettävän penkereen ja rakenteiden oman painon seuraavasti: Penkereen ja rakenteiden oman painon oletetaan siirtyvän paaluille. Maassa olevan paalun painoa ei tarvitse ottaa huomioon. Paaluhattarakenteen hatun ja paalulaatan tilavuuspainona käytetään  $25 \text{ kN/m}^3$ . /18/

Pengerkuorma  $p$  lasketaan penkereen muotoisena jakautuneena pystykuormana penkereen keskimääräisen tilavuuspainon  $\gamma$  ja pengerkorkeuden  $H$  avulla. Pengerkorkeus  $H$  määritetään hattujen tai paalulaatan yläpinnasta penkereen yläpintaan. /18/ Pengerkuorma lasketaan kaavan 3.10 mukaan.

$$p = \gamma \cdot H \quad (3.10)$$

Tavanomaisten soratäyttöjen tilavuuspainona voidaan käyttää  $20 \text{ kN/m}^3$  ja kitkakulmana  $\phi=38^\circ$ . /18/

Julkaisun: Pohjarakenteet sillansuunnittelussa, mukaiset karkearakeisten maalajien ja moreenin tilavuuspainot on esitetty taulukossa 3.10.

*Taulukko 3.10. Karkearakeisten maalajien ja moreenien lujuus- ja muodonmuutosarvojen arviointi rakeisuuden ja kairausvastusten perusteella. /13/*

Maalaji		Tilavuuspaino (kN/m <sup>3</sup> ) pohjaveden- pinnan		Kitka- kulma $\phi$ (ast.)	Moduuli-		Kairausvastukset		
					luku m	eksp. $\beta$	puristink. $q_c$ (MPa)	painok. pk/0,2 m	heijarik. L/0,2 m
		yläpuol.	alapuol.						
Karkea siltti	L	14...16	9...	28	30...100	0,3	<7	<40	<8
	K			30	70...150	0,3	7...15	40...100	8...25
	T	16...18	11	32	100...300	0,3	>15	>100	>25
Hieno- hiekk $d_{10} < 0,06$	L	15...17	9...	30	50...150	0,5	<10	20...50	5...15
	K			33	100...200	0,5	10...20	50...100	15...30
	T	16...18	11	36	150...300	0,5	>20	>100	>30
Hiekka $d_{10} > 0,06$	L	16...18	10...	32	150...300	0,5	<6	10...30	5...12
	K			35	200...400	0,5	6...14	30...60	12...25
	T	18...20	12	38	300...600	0,5	>14	>60	>25
Sora	L	17...19	10...	34	300...600	0,5	<5,5	10...25	5...10
	K			37	400...800	0,5	5,5...12	25...50	10...20
	T	18...20	12	40	600...1200	0,5	>12	>50	>20
Moreeni	HL	16...19	10...12	...34	( $\leq 100$ ) 1) 300...600	0,5	<10	<40	<20
					(100...250) 1)				
	L	17...20	10...12	...36	600...	0,5	>10	40...100	20...60
	K	18...21	11...13	...38	800...	0,5	-	>100	60...140
	T	19...23	11...14	...40	1200...	0,5	-	lyömällä	>140

1) Jos moreeni ei ole ollut jäätikön puristamana.

Taulukossa 3.10 esitetyt karkearakeisten maalajien ja moreenin materiaali-parametrit kuvaavat ensisijaisesti luonnontilaisten maalajien ominaisuuksia. Esitettyjä maalajien tilavuuspainoja voidaan myös soveltaen käyttää pengermateriaalien tilavuuspainoja arvioitaessa.

Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet mukaan sillan taustatäytyissä, kun lasketaan siltaan kohdistuvia kuormia, käytetään täyttömateriaalin tilavuuspainona 21 kN/m<sup>3</sup>. /21/

### Maanpaine

Maanpaineen muodostumisen Tiehallinnon julkaisu, Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnitteluohje, määrittää seuraavasti: Pystykuorma aiheuttaa aina vaakasuoran kuormituksen rakenteen sisällä. /18/

Vaakasuora kuormavaikutus siirtyy laatalle tai paaluhatturakenteessa hatun välityksellä suoraan paaluille. Maanpaineesta aiheutuvat sisäiset vaakavoimat on otettava vastaan joko laatan raudoituksella tai vinopaaluilla. /18/



Paalulaatan yläpintaan kohdistuva vaakavoima lasketaan lepopaineen avulla. Lepopaineen aiheuttama vaakakuorma  $F_H$  lasketaan keskimääräisenä arvona kaavalla 3.11 /18/.

$$F_H = K_0 \left( \gamma_m \frac{H^2}{2} + p \cdot H \right) \tag{3.11}$$

Kaavassa 3.11 kerroin  $H$  vastaa penkereen korkeutta paalulaatan yläpinnasta,  $\gamma_m$  penkereen keskimääräistä tilavuuspainoa ja  $p$  tien pinnassa vaikuttavaa 20 kN/m<sup>2</sup> pintakuormaa. Lepopainekerroin  $K_0$  lasketaan kaavan 3.12 mukaan.

$$K_0 = 1 - \sin \varphi \tag{3.12}$$

Kaavassa 3.12  $\varphi$  vastaa penkereen keskimääräistä kitkakulmaa.

Kaava 3.11 huomioi siis myös pystysuoran liikennekuorman aiheuttaman vaakasuoran kuormavaikutuksen. Mikäli vaakasuoran kuorman muodostumista tahdotaan tutkia tarkemmin pitää liikennekuormien ja pengerkuormien aiheuttamat vaakakuormitukset tutkia erikseen.

3.2.2 Moottori- ja päätiet

Paalulaattarakenteiden käyttöalueen voidaan osittain katsoa määräytyvän paalulaattarakenteelle vaihtoehtoisten rakenteiden geoteknisiin laskelmiin perustuen. Paalulaattarakenne edustaa varmaa ratkaisua, jonka käyttö on perusteltua vaikeissa pohjasuhteissa vaihtoehtoisten perustamismenetelmien ollessa teknisesti riittämättömiä tai taloudellisesti liian kalliita. Tekniset kriteerit määräytyvät tierakenteissa tienpinnan sallittujen muodonmuutosten perusteella. Sallittuja muodonmuutoksia kuten painumaa tutkittaessa on kuitenkin aina varmistuttava riittävästä penkereen vakavuudesta.

Moottori- ja pääteillä ovat tiestön muodonmuutuskriteerit muita tieluokkia tiukemmat. Sallitut painumat sekä sallitut pituus- ja sivukaltevuuden muutokset, jotka yhdessä pohjasuhteiden kanssa määrittävät tiessä käytettävän perustusmenetelmän, ovat taulukon 3.11 mukaiset.

Taulukko 3.11. Moottori- ja pääteiden tienpinnan laskennalliset sallitut kaltevuuden muutokset, maksimi painumat ja sivukaltevuuden muutokset 30 vuoden aikana asfalttipäällysteisillä teillä. /21/

Tien toiminnallinen luokka (Mitoitusnopeus [km/h])	Sallittu pituuskaltevuuden muutos $\Delta p_k$	Sallittu painuman maksimiarvo $S_{max}$	Rajapituuden arvo $L_r$	Sallittu sivukaltevuuden muutos
	[%]	[mm]	[m]	[%]
Moottoriväylät (120 km/h)	0,6	400	67	1,5
Päätiet (105 km/h)	0,8	500	63	1,5

Edellä mainitut tienpinnan sallitut muodonmuutokset on määritetty 30 vuoden käyttöiälle. Paalulaattarakenne valitaan, kun vaihtoehtoisilla perustusmenetelmillä ei edellä mainittuja muodonmuutuskriteerejä kyetä saavuttamaan tai niiden saavuttaminen ei ole taloudellisesti perusteltua. Paalulaattarakenne itsessään on käytännössä painumaton rakenne.

Taulukon 3.11 mukaisia muodonmuutuskriteerejä käytetään julkaisun, Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet, mukaan seuraavasti: Tien pituus- ja poikkisuuntaisten laskennallisten sallittujen kaltevuudenmuutosten ja maksimipainumien tulee täyttää tilaajan tiesuunnitelmassa asettamat hanke- ja kohdekohtaiset vaatimukset. Tien poikkisuunnassa sovelletaan sallitun kaltevuudenmuutoksen kriteeriä. Tien pituussuunnassa sovelletaan sallitun kaltevuudenmuutoksen ja maksimipainuman kriteeriä. Maksimipainuman kriteeriä sovelletaan vain rajapituutta  $L_r$  suuremmilla painumapituuksien arvoilla. Rajapituus  $L_r$  saadaan sallitusta maksimipainumasta jakamalla se sallitulla kaltevuuden muutoksella. /21/

Taulukossa 3.11 esitetyllä rajapituudella voidaan kuitenkin katsoa olevan varsin teoreettinen merkitys. Muodonmuutuskriteerien toteutumiseksi voidaan tämän kaltaisilla pituuksilla joutua käyttämään useitakin perustamismenetelmiä sekä siirtymäarakenteita. Tällöin maksimipainuma pitäisi käsittää useamman perustamismenetelmän yhteenlaskettuna painumana. Suomen pohjasuhteiden pienipiirteisyydestä johtuen olisi varsin optimistista olettaa pohjasuhteiden pysyvän samankaltaisina taulukon 3.11 määrittämän rajapituuden verran.

Perustusmenetelmää valittaessa on huomioitava myös tien sallitut routanousut. VTT julkaisun: Tierakenteen routamitoitus, mukaan teiden mitoittavana routanousuna voidaan pitää taulukon 3.12 mukaisia arvoja.

*Taulukko 3.12. Mitoittava routanousu erilaisilla teillä. /10/*

Tie	Mitoituspakkasmäärä F(d), Kh	Suurin routa- nousu (mm)	Suurin routa- nousun kul- manmuutos ‰
Moottoritie	F(10)	30	5
Päätie	F(10)	50	7
Paikallistie	F(10)	100	10

### 3.2.3 Muut tiet

Muiden tieluokkien osalta paalulaattarakenteiden käyttöalueiden määräytyminen poikkeaa moottori- ja pääteistä vain tieluokka kohtaisten, sallittujen muodonmuutos kriteerien osalta. Tiehallinnon julkaisun, Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet, mukaiset muodonmuutuskriteerit seudullisille teille ja paikallisväylille ovat 30 vuoden ajalta taulukon 3.13 mukaiset.



*Taulukko 3.13. Muiden teiden tienpinnan laskennalliset sallitut kaltevuuden muutokset, maksimi painumat ja sivukaltevuuden muutokset 30 vuoden aikana asfalttipäällysteisillä tiellä. /21/*

Tien toiminnallinen luokka (Mitoitusnopeus [km/h])	Sallittu piti- tuuskalte- vuuden muu- tos $\Delta pk$	Sallittu pai- numan maksimiar- vo $S_{max}$	Rajapituu- den arvo $L_r$	Sallittu sivu- kaltevuuden muutos
	[%]	[mm]	[m]	[%]
Seudulliset tiet (90 km/h)	1,1	600	55	2,0
Paikallisväylät (80 km/h)	1,6	700	44	2,0
(60 km/h)	2,2	800	36	2,0

Muiden teiden sallittuna routanousuna voidaan pitää taulukon 3.12 kohdan, paikallistie mukaisia routanousun arvoja.

### 3.3 Kadut

#### 3.3.1 Käyttöalueiden määräytyminen

Paalulaattarakenteiden käyttöalueet katurakentamisessa voidaan pohjasuhteiden osalta katsoa yhtäläisiksi tierakenteiden kanssa. Tiehallinnon julkaisun, Paalulaattojen ja paaluhattarakenteiden suunnitteluohje, mukaiset paalulaattarakenteen tyypilliset käyttöalueet sekä pohjamaan leikkauslujuuden minimiarvot on esitetty kappaleissa 2.1 ja 3.2.1.

Kun paalulaattarakenteiden käyttöalueita tutkitaan sallittujen muodonmuutokriteerien osalta, muodostuvat paalulaattarakenteiden käyttöalueet katurakenteilla jopa tierakenteita laajemmiksi. Sallittujen maksimi painumien erot voidaan havaita vertailemalla taulukoiden 3.14, 3.15 ja 3.16 mukaisia sallittujen painumien raja-arvoja. Sallitut maksimi painumat voivat tierakenteilla olla moninkertaisia katurakenteisiin verrattuna.

Myös paalulaattarakenteen suunnittelussa käytetyissä liikennekuormituksissa voi olla eroja tie- ja katurakenteiden osalla. Vaikka vilkasliikenteisillä pää- ja paikallisväylillä pitää paalulaattarakenteen mitoituksessa yleensä käyttää tierakenteille ominaista, kappaleessa 3.2.1 esitettyä kuormaluokan I liikennekuormaa sekä mahdollisesti raskasta erikoiskuormaa, voivat vähäliikenteisten, yleensä painorajoitettujen katujen liikennekuormitukset olla huomattavasti näitä alhaisemmat. Toisaalta pienillä liikennekuormituksilla paalulaatan mitoituksen kannalta merkittävimmän kuormitustapauksen voi aiheuttaa myös raskas työkone. Työkoneiden kuormitukset on esitelty kappaleessa 3.2.1.

Muut tapauskohtaisesti määräytyvät pysty- ja vaakakuormitukset ovat vilkasliikenteisillä pää- ja paikallisväylillä kappaleen 3.2.1 mukaisia.

Lisäksi katujen suunnittelussa pitää usein huomioida taajaman infrastruktuurin mahdollisesti katurakenteille aiheuttamat erityispiirteet. Katujen perusta-

mistavan valinnassa on tällöin huomioitava esimerkiksi viettoviemäreille mahdollisesti aiheutuvat epätasaiset painumat. Viemäreille epätasaista painumaa aiheuttaa esimerkiksi puutteet siirtymärakenteissa viemäriin perustamistavan muuttuessa. Räikeinä esimerkkeinä mainittakoon, ilman siirtymärakenteita toteutetut, pehmeikölle maanvaraisesti rakennetun viemäriin liittymisen kadun paalulaatalle sekä pehmeikölle maanvaraisesti perustetun kadun risteäminen paaluille perustetun viemäriin kanssa. Näistä ensin mainittu heikentää viemäriin toimintaa tai jopa rikkoo sen. Viimeksi mainittu puolestaan aiheuttaa heiton kadun pinnassa, kadun painuessa viemäriin ympärillä. Näin ollen siirtymärakenteiden merkitys korostuu katujen ja muun infrastruktuurin kohdatessa.

### 3.3.2 Pääkadut

Paalulaattarakenteiden mitoituksessa käytetään pääkatujen osalta liikennekuormituksena kappaleessa 3.2.1 esitettyjä kuormaluokan I kuormituksia syyssäylisineen.

Paalulaattarakenteiden käyttöalue voidaan määrittää julkaisussa: Katu 2002, Kadunrakennuksen tekniset ohjeet, esitettyjen kadun pintarakenteen painuma- ja muodonmuutoskriteerien mukaan. Nämä raja-arvot on esitetty taulukossa 3.14.

*Taulukko 3.14. Sallittu painuma (s), routanousu (F) ja kaltevuuden muutos liikennealueilla. /11/*

Kohde	Aika				Kaltevuuden muutos	
	s/5v	F/5v	s/20v	F/20v	Sivu	Pituus
1. Pää- ja paikallisväylät						
- asfaltti	100	75	200	120	0,4	1,1
- raitiotie	50	50	100	75	0,3	1,0
2. Hidas- ja pihakadut						
- asfaltti	100	100	200	150	0,5	1,3
- sora	125	120	250	175	0,8	1,6
- kiveys	50	75	100	120	0,5	1,3

Pääväylillä sallitut maksimi painumat ja kaltevuudenmuutokset on esitetty taulukon 3.14 kohdassa pää- ja paikallisväylät.

### 3.3.3 Muut kadut

Paalulaattarakenteet muissa katuluokissa mitoitetaan pääsääntöisesti kuormaluokalle I tai raskaalle erikoiskuormalle. Tapauskohteisesti, painorajoite- tuilla reiteillä voidaan kuitenkin mitoituksessa käyttää kuormaluokkaa I alhaisempia kuormituksia. Tällöin voivat työkoneluomat saavuttaa yhä useammin mitoituksen kannalta merkittävän roolin.

Muiden kuin pääkatujen painuma- ja muodonmuutoskriteereinä voidaan kadun mitoitussnopeudesta ja liikennemäärästä riippuen käyttää taulukossa 3.14 kohdissa 1 ja 2 ilmoitettuja raja-arvoja.



### 3.4 Pihat

Piha-alueilla paalulaattarakenteiden käyttöalueet määräytyvät pohjasuhteiden osalta kappaleissa 2.1 ja 3.2.1 esitettyjen teiden paalulaattarakenteiden käyttöalueiden mukaisesti. Kuormitukset puolestaan määräytyvät julkaisun, RIL 144-2002, Rakenteiden kuormitusohjeet, mukaan. Ajoneuvoliikenteelle ja ajoneuvojen pysäköintiin tarkoitettut autosuojat, paikoitus- ja pihatasot jaetaan neljään kuormaluokkaan: I, II, III ja IV /14/. Kuormaluokat kuormituksiin on esitetty taulukossa 3.15.

Taulukko 3.15. Autosuojien, paikoitus- ja pihatasojen kuormat. /14/

Kuormaluokka	Pystysuorat kuormat <sup>1)</sup>		Vaakasuoja kuorma (jarru- kuorma) (kN)
	Pintakuorma (kN/m <sup>2</sup> )	Pistekuorma (kN)	
I Liikennettä ei ole rajoitettu	10	Kappaleen 3.2.1 kuormaluokan II mukaiset akselikuormat (ilman raskasta erikoiskuormaa) <sup>2)</sup> 50+50 <sup>3)</sup>	100
II Henkilö-, paketti- tai kuorma-autot, joiden kokonaispaino ≤ 15 t	10	20	75
III Henkilö- tai pakettiautot, joiden kokonaispaino ≤ 4,5 t	5	10	20
IV Henkilöautot, joiden paino ≤ 2,0 t	2,5		10

1) Pintakuorman ja pistekuorman ei oleteta vaikuttavan samanaikaisesti. Pistekuorman kuormitusala on luokassa II 0,3\*0,3 m<sup>2</sup> ja luokassa III ja IV 0,1\*0,1 m<sup>2</sup>.

2) Akselikuormalla kuormitetaan enintään kaksi mielivaltaisesti sijoitettua, toisiinsa nähden yhdensuuntaista kuormakaistaa.

3) Pistekuormien (2 kpl) keskinäinen väli on 1,7 m.

Perustusmenetelmien vertailussa ja valinnassa käytettävänä muodonmuutuskriteereinä käytetään piha-alueilla taulukossa 3.16 esitettyjä julkaisun: Pohjarakennusohjeet (RIL 121-2004) mukaisia piha-alueiden painuma- ja muodonmuutuskriteerejä.

*Taulukko 3.16. Piha-alueiden laatuluokitus ja suositellut rakennevaatimukset. /13/*

Laatuluokka	Kulutuskerros	Vaatimukset Ulkonäkö	Sallitut pitkä- aikaiset (yli 30 vuoden aikana) painumat	Routaliikkeet (F <sub>10</sub> )
Luokka 1 Piha ja alueet, joille asetetaan erityisen suuret toiminnalliset tai ulkonäölliset vaatimukset	sidottu	Päälyste säilyy halkeilemattomana	alle 100 mm	enintään 50 mm
	sitomaton	-	alle 100 mm	enintään 50 mm
Luokka 2 Muut asunto-, ja toimisto- ja liike- rakennusten pihat	sidottu	Päälysteessä vähäisiä kunnos- sapidolla hoidet- tavia halkeamia	alle 300 mm	enintään 100 mm
	sitomaton	-	alle 300 mm	enintään 100 mm

Pihojen osalta on lisäksi huomioitava mitä katujen osalta niiden liittyessä taajaman infrastruktuuriin mainittiin. Toimiva ja siten myös taloudellinen infrastruktuuri toteutetaan suunnitteleamalla muodonmuutuskriteerit täyttävä siirtymärakenne eri perustusmenetelmin perustettujen rakenteiden välille.



## **4. PAALULAATAN SUUNNITTELU**

### **4.1 Laattatyypit**

#### **4.1.1 Laattatyypin valinta**

Tiehallinnon julkaisun: Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnitteluohje, mukaan laattatyypin valintaan vaikuttavia tekijöitä ovat massoihin liittyvien kustannusten lisäksi laatan muoto, alustäytön vaikeus, laatan muotitustarve, raudoitustyön vaikeus sekä mahdollinen varautuminen paalujen epätasaisiin painumiin. /18/

Alustäytön vaikeudella viitataan laatan alustäytön betonin sitoutumisen aikaan painumiin ja varautumisella paalujen epätasaisiin painumiin tämän muille paaluille aiheuttaman lisäkuormituksen huomioon ottamiseen. Paalujen epätasainen painuma ei kuitenkaan saa johtaa laatan sallitun halkeama-levyden ylittymiseen.

Kun ratahankkeet ovat nykyisin yhä enemmän olemassa olevan rataverkon korjauksia tai palvelutason parantamista, laattatyypin valintaan vaikuttavat yhä useammin paalulaatan rakennusaika sekä sen sovittaminen lyhyehköihin liikennekatkoihin. Rakennuskustannusten suhteellinen osuus kokonaiskustannuksiin verrattuna on usein vähäinen. Ratojen korjausrakentamisessa ja laatu- ja palvelutason parantamisessa yleisesti käytetty palkkilaattaratkaisu on esitetty kappaleessa 7.3.2

#### **4.1.2 Tasapaksu laatta**

Tasapaksu laatta on laattatyypeistä yksinkertaisin rakentaa. Tasapaksu laatta, jonka periaatekuva on esitetty kappaleessa 2, voi Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnitteluohjeen mukaan olla leikkausraudoitettu tai leikkausraudoittamaton. Tasapaksujen laattojen muotteina käytetään lauta- tai levymuottia /7/.

Tasapaksu laatta on poikkileikkaukseltaan massiivisempi kuin sieni- tai palkkilaatta, jolloin sitä käytettäessä on erityisesti heikosti kantavilla pehmeillä kiinnitettävä huomioitava valualustan painumaan betonin sitoutumisen aikana. Toisaalta tasapaksu laatta mahdollistaa betonisen työlaatan käytön. Tarvemmen toimenpiteitä valualustan painumisen vähentämiseksi käsitellään laatan geoteknisen suunnitellun yhteydessä kappaleessa 4.2.

Tasapaksu laatta ei ole rakenteellisesti edullisin. Kun laatan paksuus valitaan eteenkin leikkausraudoittamattomissa laatoissa useimmiten paalun läpi leikkautumisen mukaan, riittäisi usein tätä pienemmän rakennekorkeuden kestävyys paalujen välisillä alueilla muodostuvia rasituksia vastaan.

#### **4.1.3 Sienilaatta**

Sienilaatan, joka on Suomessa käytetyin paalulaattarakenteen laattatyyppi, periaatekuva, on esitetty kappaleessa 2. Sienilaatan rakentaminen poikkeaa muista laattatyypeistä olennaisesti siinä, että sen rakentaminen vaatii

enemmän työtunteja laatan sieniosan valmistamiseen. Paalutuksen jälkeen paalulaatan alustäyttöön erilaisin muotokappalein tai muotoilevin laittein muodostettavat sienet voivat muodoltaan olla yleisesti nelikulmaisia tai pyöreitä kartioita. Muotituksen avulla voidaan rakentaa myös suorakaiteen muotoisia, hattumaisia sieniä.

Sienilaatassa julkaisun: Paalulaattojen ja paaluhattarakenteiden suunnitteluohe, mukaan voi varsinainen laatta eli välilaatta olla raudoitettu joko yhteen tai kahteen tasoon. Lisäksi sienilaatan sieniosa sisältää usein leikkausraudoituksen.

Käytettäessä sieninä elementti- tai paikalla valettuja hattuja, joiden kiinnitys varsinaiseen laattaosaan varmistetaan vain hatun betonipinnan karhennuksella, kyseessä ei ole sienilaatta vaan paaluhattarakenteena toimiva ns. hattulaatta.

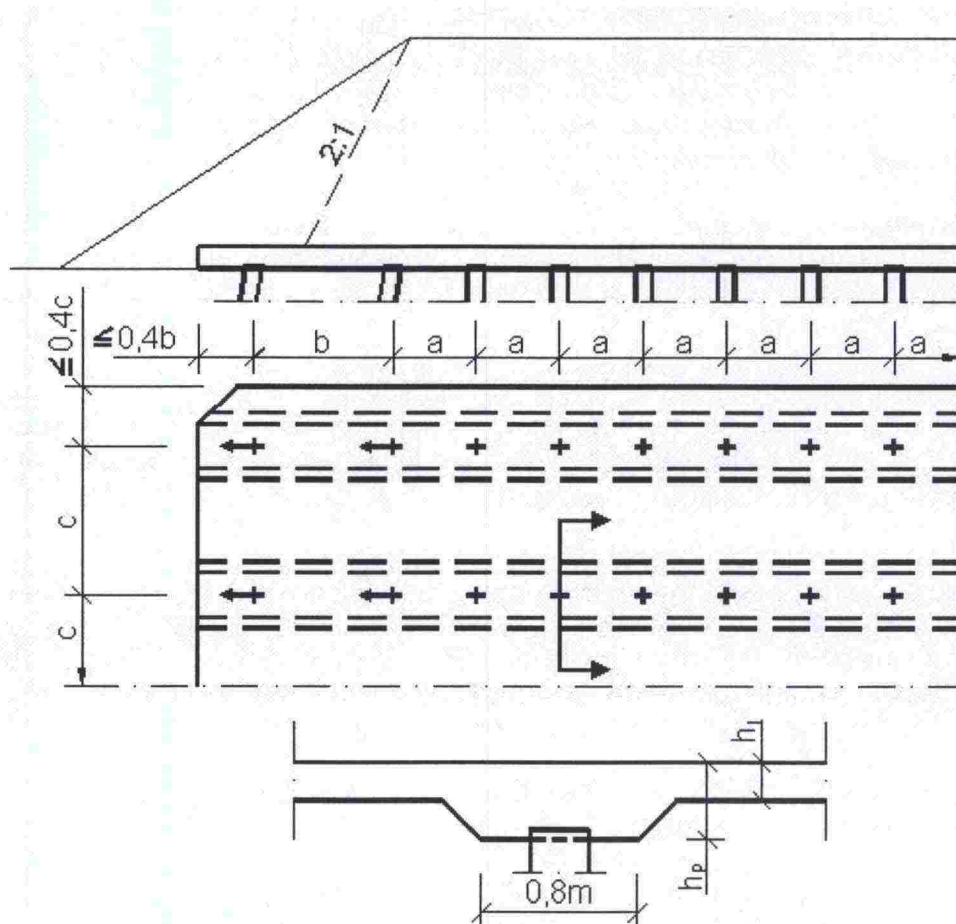
Sienilaatan muoto on rakenteellisesti huomattavasti tasapaksua laattaa edullisempi. Tällöin sienilaatta on myös materiaalikustannukset huomioon ottaen tasapaksua laattaa edullisempi. Lisäksi sienilaatan paaluille aiheuttama kuormitus on muita laattatyyppejä pienempi. Sienilaatan muodon ollessa rakenteellisen kapasiteetin kannalta lähellä optima, voidaan sen heikkoutena pitää herkkyyttä sijainti- ja mittapoikkeamien suhteen.

Hyvin korkeilla, noin 10 metrin penkereillä laatan paaluvälit jäävät varsin lyhyiksi. Tällöin myös sienien välinen ohuempi laattaosa jää lyhyeksi. Pengerkorkeudella, jolla laatan ohuempi osa on erittäin lyhyt tai sienet jopa kasvavat yhteen menettää sienilaatan muoto materiaalikustannuksia ajatellen etunsa tasapaksuun laattaan nähden. Tasapaksu laatta on tällöin myös huomattavasti helpompi rakentaa. Toisaalta 10 metrin tai sen ylittävillä pengerkorkeuksilla ns. pehmeikkösilta voi muodostua paalulaattarakennetta edullisemmaksi vaihtoehdoksi. Paalulaattarakenteen taloudelliseen kilpailukykyyn vaikuttavat tällöin erityisesti pehmeikön paksuus sekä pengermateriaalin kustannukset.

#### **4.1.4 Palkkilaatta**

Palkkilaatan rakenteellinen toiminta, joka perustuu palkkiosan palkkien suuntaiseen ja laattaosan palkkeja vastaan kohtisuoraan pääraudoitukseen, poikkeaa olennaisesti tasapaksusta laatasta ja sienilaatasta. Palkkilaattaa rakennettaessa rakennetaan ensin ns. palkkikaistat. Palkkikaistat voidaan rakentaa joko muottien avulla tai muotoilemalla palkkiosa työalustaan. Tämän jälkeen suoritetaan rakenteen valu paikallavaluna. Kun massiivisten tien tai radan suuntaisten palkkien päälle asennetaan elementtilaatat, on rakenteen toiminta palkkilaatan kaltainen, mutta tällöin puhutaan elementtilaatasta. Kuvassa 4.1 on esitetty palkkilaatan periaatekuva.





Kuva 4.1. Palkkilaatan periaatekuva. /18/

Palkkilaatan etuna voidaan pitää sen rakenteellisen mallinnuksen selkeyttä ja säästöjä raudoitemäärissä. Palkkilaatta mahdollistaa myös palkkikaistojen välejä vastaavat, muita laattatyyppisiä suuremmat paaluvälit.

Palkkilaatan heikkoutena voidaan pitää rakenteen herkkyyttä paalujen sijaintipoikkeamille kohtisuorassa palkkikaistaa vastaan. Kun palkkikaistan raudituksen lisääminen ei riitä, sallittujen sijaintipoikkeamien ylitykset voivat johtaa lisäpaalujen tarpeeseen. Palkkilaatan heikkoutena voidaan pitää myös rakenteen sienilaattaa suurempaa betonimenekkiä sekä muotituksen osalta kalliimpia työkustannuksia kuin tasapaksulla laattalla.

## 4.2 Geotekninen suunnittelu

### 4.2.1 Laatan mittojen valinta alueellisen ja penkereen stabiiliteetin mukaan

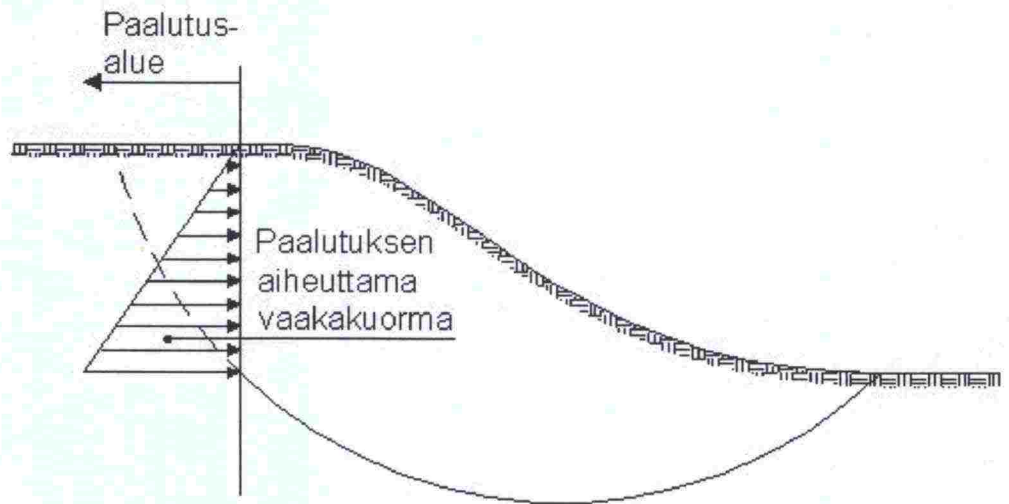
#### Alueellinen stabiiliteetti

Lähdettäessä suunnittelemaan paalulaattarakennetta on luonnontilaisen maapohjan vakavuus alueellista sortumaa vastaan paalutusalueella julkaisun: Paalulaattojen ja paaluhattarakenteiden suunnitteluohje, mukaan oltava vähintään 1,8, ellei tilaaja erillisen selvityksen perusteella ole määritellyt al-

haisempaa varmuuslukua. /18/ Mikäli maapohjan vakavuus ei ole riittävä, voidaan sitä parantaa erilaisin maapohjan vahvistustoimenpitein tai esimerkiksi vastapenkereellä, riittävän varmuuden saavuttamiseksi. Vastapengertä käytettäessä pitää myös vastapenkereen stabiiliteetista varmistua.

Varmuus vähintään 1,8 vastaa yleisesti ajateltuna maapohjan tilaa, jossa plastisia eli palautumattomia muodonmuutoksia ei tapahdu.

Paalujen lyönnistä aiheutuva maan syrjäytyminen lisää maan jännityksiä ja aiheuttaa huokosylipainetta paalun ympäristössä. Tämä on otettava huomioon alueellista vakavuutta laskettaessa. Tarkemmin paalutuksen aiheuttamaa huokosylipainetta ja toimenpiteitä paalutuksen aiheuttaman huokosylipaineen pienentämiseksi käsitellään kappaleessa 5. Kuvassa 4.2 on esitetty periaate paalutuksen aiheuttaman vaakasuoran kuormavaikutuksen huomioimiseksi vakavuuslaskennassa.



Kuva 4.2. Paalutuksen aiheuttaman vaakasuoran kuormavaikutuksen huomioiminen vakavuuslaskennassa. /18/

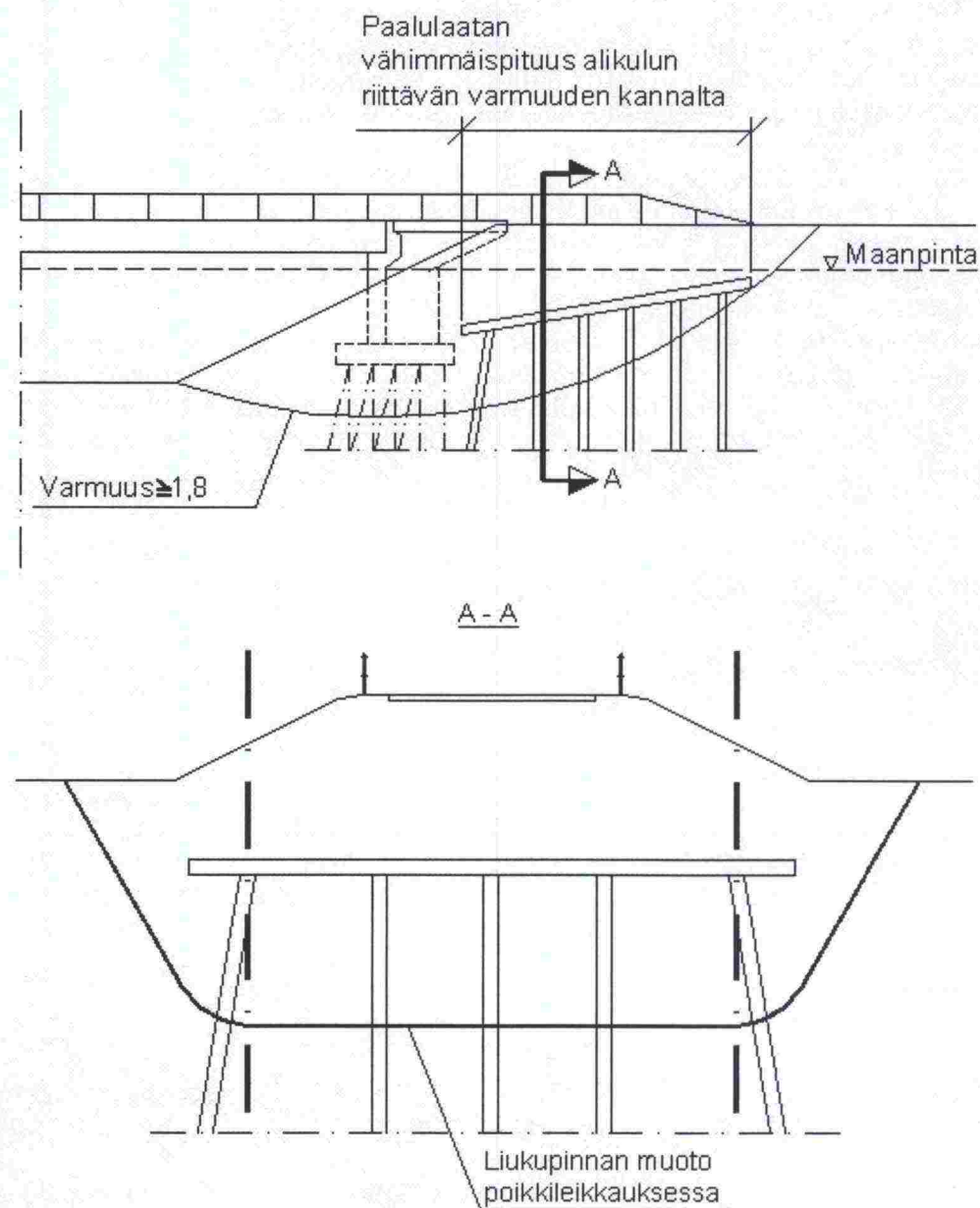
Paalutuksen aiheuttaman vaakakuorman voidaan olettaa olevan heti paalutuksen jälkeen enintään kaavan 4.1 suuruinen. Lepopaine oletus on riittävä, kun paalutuksen yhteenlaskettu pinta-ala kokoalueen pinta-alasta on 2 % tai pienempi.

$$\sigma_p = z \cdot \gamma_{sat} \quad (4.1)$$

, missä  $z$  on syvyys maanpinnasta  
 $\gamma_{sat}$  on häiriintyneen maan tilavuuspaino

Rakennettaessa alikulku aiemmin pehmeikölle rakennettuun tiehen, katuun tai rataa, voi alikulun luiskien varmuus osoittautua riittämättömäksi ilman erillisiä pohjanvahvistustoimenpiteitä. Tällöin alikulun luiskien varmuutta voidaan parantaa esimerkiksi rakentamalla paalulaatat alikulun sillan jatkeiksi. Paalulaatan pituus on edelleen valittava siten, että paalulaatan ulkoreunan kautta kulkevan liukupinnan varmuus on vähintään 1,8. Asiaa on havainnollistettu kuvassa 4.3.





Kuva 4.3. Paalulaatan pituuden määräytyminen ulkoisen stabiileetin mukaan paalulaatan liittyessä siltaan.

Vakavuus tarkastelu tehdään yleensä 2-ulotteisena, jolloin tarkastellaan kuvan 4.3 poikkileikkauksen pistekatkoviivoilla rajattua osaa. Mikäli vakavuutta halutaan tutkia tätä tarkemmin, voidaan liukupinnan kuvan 4.3 poikkileikkauksessa ylöspäin kääntyvät liepeet huomioida 3-ulotteisella tarkastelulla, kuten elementtimenetelmällä.

Kuvassa 4.3 esitetyn siltaan liittyvän paalulaattarakenteen suunnittelussa on huomioitava alikulun mahdollisesti aiheuttama pohjaveden paikallinen alenema. Pohjaveden alenema, jonka vaikutuspiiri pehmeiköillä on maakerosten huonon vedenjohtavuuden vuoksi usein kuitenkin pieni, voi aiheuttaa paalulaattarakenteelle ylimääräisiä kuormituksia, kuten negatiivista vaippahankausta.

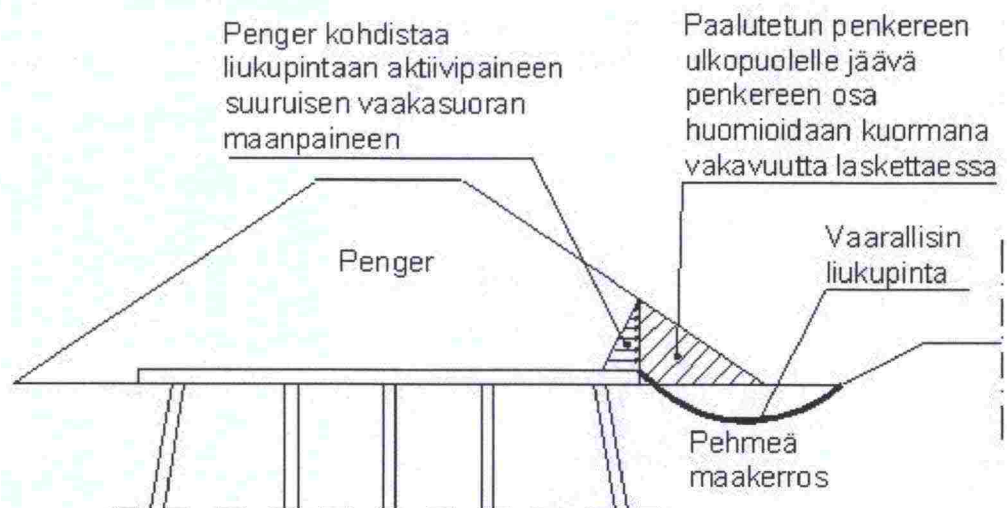
Varsinaisia vakavuustarkasteluja voidaan alustavasti tehdä siipikairauksien perusteella liukupinta-analyysinä  $\varphi=0$  - menetelmällä. Vaativammissa tapauksissa, maaston korkeuserojen ollessa merkittäviä tai kokonaisjännityksiin perustuvalla  $\varphi=0$  - menetelmällä lasketun varmuuden ollessa alle 2,5, varsinaiset laskelmat tehdään kolmiaksaalikokeiden ja pitkäaikaisten huokospainemittauksien perusteella liukupinta-analyysinä  $c\varphi$  - menetelmällä.  $c\varphi$  - menetelmä perustuu tehokkaisiin jännityksiin. /21/

Vakavuuslaskennassa yleisin käytetty liukupinta on ympyräliukupinta. Laskennassa voidaan käyttää myös muita liukupintoja, mikäli penkereen käyttäytyminen oletetaan pohjatutkimusten perusteella ympyräliukupinnasta poikkeavaksi.

Käytännön suunnittelussa käytetään yleensä geoteknisiä, analyyttisiä suunnitteluohjelmia, sillä käsinlaskenta johtaa usein lukuisiin iterointeihin vaarallimman liukupinnan löytämiseksi ja on siten aikaa vaativaa. Myös erilaisten numeeristen menetelmien käyttö on yleistynyt geoteknisessä suunnittelussa. Numeeristen menetelmien käyttö mahdollistaa myös vakavuuden herkkyystarkastelut, joilla esimerkiksi vaativissa kohteissa voidaan huomioida paalujen toiminta liukupinnassa, sekä saada lisätietoa siirtymistä ja progressiivisen murtuman mahdollisuudesta.

#### Penkereen stabiliteetti

Penkereen stabiliteetti kuvaa paalulaattarakenteessa penkereen osan varmuutta liukusortumaa vastaan. Vakavuutta mitoitettaessa pitää paalutetun penkereen ulkopuolelle jäävän penkereen osan kokonaisvarmuus liukusortumaa vastaan olla vähintään 1,8. Tilannetta on havainnollistettu kuvassa 4.4.



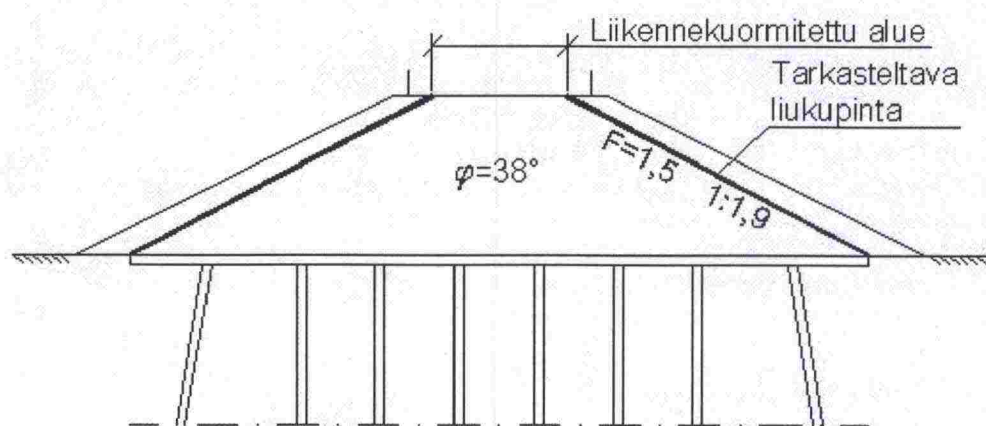
Kuva 4.4. Periaate paalutetun penkereen ulkopuolelle jäävän penkereen osan vakavuuden laskemiseen.

Koska pengermateriaalien ominaisuudet poikkeavat oleellisesti pehmeikön pohjamaan ominaisuuksista, on paalutetun penkereen ulkopuolelle jäävä penkereen osa huomioitava kuormituksena vakavuutta laskettaessa. Jo pie-



netkin pohjamaan liukupinnan muodonmuutokset aiheuttavat karkearakeisemmassa penkereessä halkeaman, jolloin pengeri ei enää vastusta liukumaa liukupinnalla. Paalulaatan leveys on valittava paalutetun penkereen ulkopuolelle jäävän penkereen osan riittävän stabiliteetin varmistamiseksi.

Toisaalta paalulaatan leveys pitää valita siten, että penkereen liikenteelle varattu osuus pysyy riittävällä varmuudella paalulaatan päällä. Varmuutta laskettaessa huomioidaan ainoastaan penkereen ominaisuudet, sillä liikennekuorman vaikutus paalulaatan reunalla on hyvin pieni. Kokonaisvarmuutta liukumista vastaan on tarkasteltava tässä tapauksessa tasoliukupinnalla. Tarkastelun periaate on esitetty kuvassa 4.5.



Kuva 4.5. Periaate penkereen liikenteelle varatun osuuden stabiliteetin laskemiseen paalulaattarakenteissa.

Penkereen liikenteelle varatun osan stabiliteetti määräytyy paalulaattarakenteessa pelkästään pengermateriaalin kitkakulman ja luiskan kaltevuuskulman mukaan, sillä pengeri voidaan yleensä olettaa kuivatetuksi, eikä penkereessä tällöin vaikuta veden huokospainetta. Varmuus voidaan tällöin laskea kaavan 4.2 mukaan.

$$F = \frac{\tan \varphi}{\tan \beta} \quad (4.2)$$

, missä  $\varphi$  on tiivistetyn pengermateriaalin kitkakulma  
 $\beta$  on tarkasteltavan luiskan kaltevuuskulma

Kun oletetaan pengermateriaalin kitkakulmaksi julkaisun: Paalulaattojen ja paaluhattarakenteiden suunnitteluohje, käyttämä  $\varphi = 38^\circ$ , saadaan luiskan varmuudella 1,5 liukusortumaa vastaan luiskan kaltevuudeksi 1:1,9. Luiskan varmuus 1,5 vastaa tilaa, jossa penkereen painumat pysyvät vähäisinä.

Edellä esitetty luiskakaltevuus johtaa hiukan nykyisiä paalulaattoja leveämpiin paalulaattoihin. Useimmat paalulaatat on nykyisin suunniteltu siten, että pengeri luiska viettää kaltevuudessa 1:1,5 pientareen ulkoreunasta luiskaan päin. Laatan leveys on tällöinkin määrätty siten, että paalulaatan ulkopuolelle jäävän penkereen osan kokonaisvarmuus liukusortumaa vastaan on vähintään 1,8. Penkereen varmuus tasoliukupinnalla jää tällöin kuitenkin alle 1,5.

Loivalla luiskalla saavutetaan säästöä kunnossapidossa, sillä penkereen suuremmalla varmuudella penkereen muodonmuutoksista johtuvat päällysrakenteen painumat jäävät vähäisemmiksi. Toisaalta liian loiva luiska voi aiheuttaa paalulaatan ulkopuoliselle pohjamaalle liian suurta kuormitusta, jolloin maan puristuminen reunapaaluja kohti aiheuttaa niille taivutusta. Edellä mainituista maan liikkeistä aiheutuva reunapaalujen taivutus on vinopaaluilla huomattavasti pystypaaluja suurempaa.

#### 4.2.2 Korkeustason ja kaltevuuden suunnittelu

Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnitteluohjeen mukaan paalulaatan korkeustaso määritetään ensisijaisesti siten, että taso mukailee olemassa olevaa tai leikattavaa maanpintaa. Laatan alle tai penkereen sivuille ei yleensä voida suunnitella täyttöä tai työalustaa, vähäisiä routasuojauksia lukuun ottamatta.

Paalulaatan alle suunniteltava täyttö on yleensä mahdollista vain kun täyttöjen maapohjalle aiheuttamat painumat täyttävät kappaleessa 4.2.3 esitetyt vaatimukset.

Paalulaatan kaltevuuden Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnitteluohje määrittelee seuraavasti: Paalulaatan kaltevuuden suurin arvo käytännössä on 1:4...1:6. /18/ Raja-arvo on asetettu laatan valun toteutettavuutta silmälläpitäen ja tällöin pitää laatan valussa käyttää riittävän jäykkää betonimassaa.

Laatan yläpinnan kaltevuus pitää suunnitella siten, ettei penkereen läpi suotautuva vesi lätäköidy. Leveissä laatoissa kallistus viettää kaksipuolisena laatan keskeltä reunoille. Kapeissa laatoissa ja kaarteissa kallistus on yksipuolinen. RMYTL 3, Perustamis- ja vahvistamistyöt, mukaan laatan yläpinta pitää valaa vähintään 2 % kaltevuuteen. Paalulaatan kuivatus voidaan suunnitella myös erityistä vedenkeräysjärjestelmää käyttäen.

#### 4.2.3 Valualustan suunnittelu

Paalulaatan valualustan tehtävä on kantaa paalulaatan valu, estää valua sekoittumasta maakerrokseen ja mahdollistaa erimuotoisten laattojen muotoilu. Paalulaattarakenteessa valualusta, joka rakennetaan työalustan tai suoraan leikkauspohjan päälle, on tehty sorasta.

Valualustan suunnittelun lähtökohtana voidaan pitää julkaisun: Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnitteluohje, mukaista määritelmää valualustan sallitulle painumalle: Valualustan painuma ei saa betonin sitoutumisaikana ylittää 5 mm. /18/

Valualustan erittäin kireällä painumakriteerillä pyritään laatan rakenteellisen toiminnan varmistamiseen. Jos valualusta ja siten myös laatta betonin sitoutumisen aikana painuvat liikaa, saattaa laatan kestävyys taivutuksen, halkeilun ja paalun läpicleikkautumisen suhteen heikentyä. Lisäksi raudoituksen ankkuroituminen rakenteessa voi vaarantua, mikäli valualusta painuu epätaisisesti.



Betonin sitoutumisaika riippuu paalulaattarakenteissa sekä valitusta betonista että ympäristöolosuhteista. Lähtökohtaisena betonin sitoutumisaikana voidaan pitää kolmea vuorokautta.

Paalulaattarakenteessa valualustan painumaa voidaan vähentää esimerkiksi seuraavin toimenpitein:

- kuivakuorikerroksen säilyttäminen
- kevyemmän laattatyypin valinta
- paalutuksen aiheuttaman maan kohoamisen ja sitä seuraavan painumisen pienentäminen tekemällä esireiät paalujen kohdille
- rakentamalla paalulaatta talvella, jolloin valualustan alapuolinen leikkauspohja on jäässä

Mikäli paalulaatta valetaan talvella, jolloin valualustan alapuolinen leikkauspohja on jäässä, pitää paalulaattarakenteen valu ja rakenteen pengertäminen tehdä siten, ettei jäänytynyt leikkauspohja pääse jäätymään syvemmälle. Roudan eteneminen voidaan pysäyttää valun aikaisella lämmityksellä ja valun jälkeisellä nopealla pengertämisellä. Jäätyneen leikkauspohjan päälle rakennetun paalulaattarakenteen osalta on varauduttava kuitenkin jäätyneen kerroksen sulamisen aiheuttamaan laatan alapuolisen tyhjätilan syntyyn.

Paalulaatan valualustan painuman vähentämisellä voidaan katsoa olevan muitakin paalulaattarakenteen kannalta positiivisia vaikutuksia. Esimerkiksi kuivakuoren säilyttämisellä ja paalutuksen aiheuttaman maan kohoamisen pienentämisellä voidaan vähentää paalulaattarakenteen paaluille mahdollisesti kohdistuvaa negatiivista vaippahankausta ja vinopaalujen taivutusta.

Paalulaatan valualustalle voidaan sallia noin 0,2...0,5 metrin kokonaispainuma, jotta laatan reunimmaisten vinojen teräsbetonipaalujen kestävyys on riittävä painuman niille aiheuttamaan taivutukseen nähden. Toisaalta valualustan sallitun painuman voi määrittää paalujen kestävyys vaakasuorien liikennekuormitusten niille aiheuttaman taivutuksen suhteen. Vaakasuoran liikennekuorman paaluille aiheuttaman taivutuksen suuruuteen vaikuttavat erityisesti pengerkorkeus sekä pohjamaan ylimpien maakerrosten paalua tukeva vaikutus.

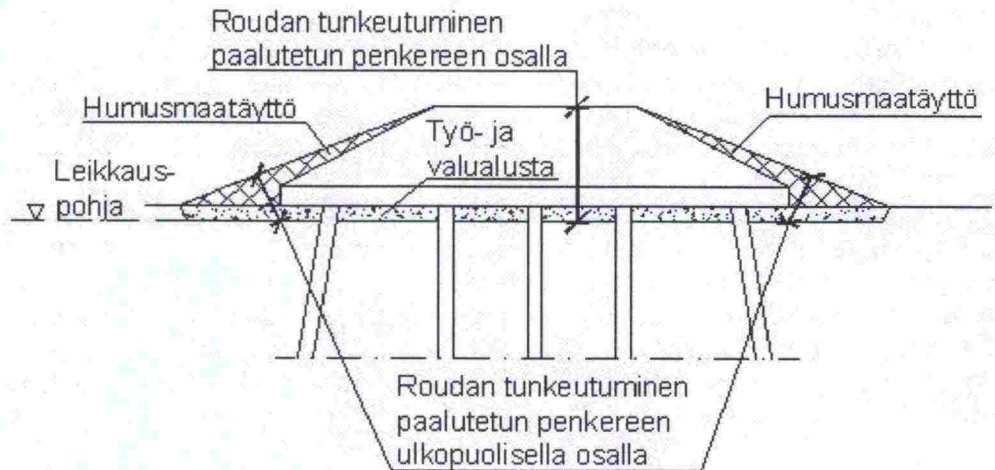
Jos edellä mainituilla toimenpiteillä valualustan painuma ei betonin sitoutumisen aikana pysy riittävän pienenä, voidaan laatta valaa esimerkiksi betonisen työlaatan päälle. Tällöin paalujen väliin, valualustalle levitetty betoni kantaa kovettumisensa jälkeen varsinaisen paalulaatan valun aiheuttaman kuormituksen tai ainakin tasaa valualustan painumia. Rakenteen etuna voidaan pitää myös sitä, että normaalisti valualustan päälle asennettavaa suodatinkangasta ei tarvita.

#### 4.2.4 Routasuojaus

Paalulaattojen ja paaluhattarakenteiden suunnitteluohjeen mukaan paalulaattarakenteen routamitoitus tehdään kerran 20 vuodessa toistuvan pakasmäärän mukaan. Roudan mitoitus syvyys määritellään syvyytenä tien pinnasta leikkauspohjaan. Routamitoitus tehdään ilman lumen suojaavaa vaikutusta. Näin menetellään myös pengerluiskien osalta. /18/

Paalulaattarakenteen routamitoitus kerran 20 vuodessa toistuvan pakkasmäärän mukaan voidaan katsoa riittäväksi, sillä paalulaattarakenne ei ole massiivisuudestaan johtuen kovinkaan arka roudan aiheuttamille liikkeille.

Koska laatan routamitoitus pitää suorittaa myös pengerluiskien osalta, on routamitoitus tehtävä luiskien kaltevuus huomioiden sekä pysty- että vaakasuunnassa. Roudan syvyys penkereessä on esitetty kuvassa 4.6.



Kuva 4.6. Roudan tunkeutuminen penkereessä ja luiskissa.

Kuva 4.6 esittää, miten routa tunkeutuu pohjamaahan. Luiskien routasuojaus voidaan helposti ja taloudellisesti tehdä esimerkiksi riittävän paksua humusmaatäyttöä käyttäen. Pienemmän tilavuuspainonsa ansiosta humusmaatäyttö aiheuttaa paalutetun alueen ulkopuolella muuta luiskatäyttöä pienempää painumaa. Mikäli luiskien humusmaatäytöllä ei kuitenkaan saavuteta riittävää routasuojautta, on luiskien osalla käytettävä lämpöeristettä. Samoin on toimittava penkereen osalla, mikäli laatan korkeusasema joudutaan valitsemaan siten, että routa ilman lämpöeristeitä tunkeutuisi leikkauspohjaan.

Routasuojauksen kannalta valittu, pohjamaan ominaisuuksiin nähden liian paksu paalutetun penkereen ulkopuolelle jäävä täyttö aiheuttaa painumia ja mahdollisesti edelleen reunapaaluihin kohdistuvia taivutus- ja leikkausrasituksia.

### 4.3 Rakenteellinen mitoitus

#### 4.3.1 Yleistä

Varsinaisten laatasta vaikuttavien voimasuureiden ratkaiseminen vaatii yleensä laskentaohjelmien käyttöä. Yleisimmin käytössä olevat menetelmät ovat elementtimenetelmä (FEM), arinamalli sekä differenssimenetelmä. Laskentaohjelmilla saadut voimasuureet eivät saa ylittää laatan rakenteellista kestävyyttä läpileikkautumisen, taivutuksen tai halkeilun suhteen.

Tietokonelaskentojen oikeellisuus pitää aina tarkastaa käsinlaskennalla. Käsinlaskentaa voidaan lisäksi käyttää rakennushankkeen tarjousvaiheen



suunnittelussa paalulaatan betoni- ja raudoitemenekkien likimääräiseen ratkaisemiseen.

#### 4.3.2 Rasitusluokat

Suomen betoniyhdistyksen julkaisun: Betoninormit 2004, mukaan ympäristöolosuhteiden mukaisen rasitusluokan XC2, johon paalulaattarakenteetkin normaalisti kuuluvat, määritelmä on seuraava: Pitkiä aikoja veden kanssa kosketuksissa olevat rakenteiden osat (useimmat perustukset kuten siltojen perustukset ja siirtymälaatat). /1/ Mikäli paalulaatta joutuu ympäristöolosuhteista johtuen kemiallisten rasitusten alaiseksi, on rasitusluokka valittava olosuhteiden mukaiseksi standardin SFS-EN 206-1 mukaan.

Rasitusluokassa XC2 paalulaatan betonipeitteen vähimmäisarvo on 25 mm ja betonin vähimmäislujusluokka K35. Betoniterästen betonipeite vaihtelee kuitenkin yleensä maata vasten valettaessa välillä 50... 100 mm ja on muualla rakenteessa 50 mm. Betonipeitteen nimellisarvo saadaan, kun betonipeitteen vähimmäisarvoon lisätään raudoituksen sallittu mittapoikkeama, kuitenkin vähintään 50 mm. Betonipeitteelle asetetut vähimmäisvaatimukset koskevat myös työteräksiä.

Betoniterästen 100 mm betonipeite on varsin suuri. Kun oletetaan terästen toimivan laatan poikkileikkauksen vedetyllä osalla, saadaan rakenteen vähimmäispaksuudeksi noin 220 mm. Sienilaattojen suunnittelussa on ohuemman laattaosan paksuutena usein käytetty 180 mm.

#### 4.3.3 Materiaalivaatimukset ja sallitut mittapoikkeamat

Ratahallintokeskuksen julkaisun: RMYTL 3, Perustamis- ja vahvistamistyöt, mukaan paalulaatoissa käytettävien betoniterästen pitää laadultaan olla A500HW. Muitakin teräslaatuja voidaan käyttää, mutta silloin teräkset on mitoitettava väsytykselle. Betonin lujuusluokan pitää vähintään olla K40-2.

Laatan raudoituksen aseman ja poikkileikkauksen mittojen tulee täyttää Suomen rakentamismääräyskokoelman betonirakenteita koskevat määräykset, ellei suunnitelmissa ole toisin määrätty. Sallitut mittapoikkeamat riippuvat käytetystä rakenneluokasta sekä poikkileikkauksen mitoista.

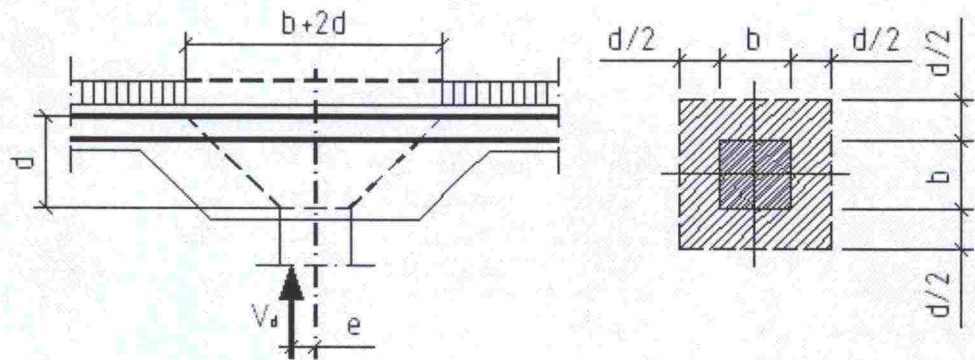
Laatan leveyden sallittuja mittapoikkeamia on käsitelty lähinnä hankekohtaisesti. Lisäksi hankekohtaisia vaatimuksia voidaan esittää laatan käyryyden ja aaltoilun suhteen.

#### 4.3.4 Läpileikkautuminen

Paalulaattaa suunniteltaessa pitää läpileikkautuminen tarkastaa kuvan 4.7 mukaisesti paalun kohdalta. Sienilaatan osalta läpileikkautuminen pitää tarkastaa myös laatan sieniosan reunojen suhteen.

Paalun läpileikkautuminen laatasta tarkastetaan murtorajatilassa. Lävistysvoimaa laskettaessa ei tarvitse ottaa huomioon kuormia, jotka sijaitsevat tuen reunasta etäisyydellä  $d$  olevan leikkauksen rajoittamalla alueella. /16/

Tarkasteltaessa sienilaatan läpileikkautumista sienien reunaosien suhteen voidaan vastaavasti kuormat, jotka sijaitsevat leikkautuvan alueen sisäpuolella jättää lävistysvoimaa laskettaessa huomioimatta. Tuella tarkoitetaan paalulaattarakenteen tapauksessa paalua. Asia on havainnollistettu kuvassa 4.7.



Kuva 4.7. Laatan lävistys. /16/

Laatan betonin lävistyskapasiteetti lasketaan kaavasta 4.3.

$$V_c = k \cdot \beta \cdot (1 + 50 \cdot \rho) \cdot u \cdot d \cdot f_{ctd} \quad (4.3)$$

, missä  $k = 1,6 - d \text{ [m]} \geq 1$ , kun  $\rho_c \geq 2400 \text{ kg/m}^3$   
 $k = 1,0$ , kun  $1800 \text{ kg/m}^3 \leq \rho_c < 2400 \text{ kg/m}^3$   
 $k = 0,85$ , kun  $\rho_c < 1800 \text{ kg/m}^3$   
 $u$  = tuen reunasta etäisyydellä  $0,5 d$  olevan leikkauksen rajoittama piiri (kuva 4.7)

Kaavan 4.3 kertoimet  $\rho$  ja  $\beta$  voidaan laskea kaavoista 4.4 ja 4.5.

$$\rho = \sqrt{\rho_x \cdot \rho_y} \leq 8 \text{ ‰} \quad (4.4)$$

, missä  $\rho_x$  ja  $\rho_y$  ovat toisiaan vastaan kohtisuorassa suunnassa etäisyydellä  $0,5 \cdot d$  tuen reunasta sijaitsevista poikkileikkauksissa olevat suhteelliset teräspinta-alat. Vedetyn pinnan raudoitusten tulee olla ankkuroitu mainittujen poikkileikkausten ulkopuolelle.

$$\beta = \frac{0,40}{1 + \frac{1,5 \cdot e}{\sqrt{A_u}}} \quad (4.5)$$

, missä  $e$  on lävistysvoiman epäkeskisyyys laskettuna leikkautuvan alueen painopisteestä (kuva 4.7)  
 $A_u$  on tuen reunasta etäisyydellä  $0,5 d$  olevan leikkauksen rajoittama pinta-ala (kuva 4.7)



Lävistysvoiman epäkeskisyyttä  $e$  ei paalulaattarakenteissa yleensä tarvitse huomioida. Ainoastaan tilanteessa, jossa paalu on jäykästi kiinnitetty paalulaattaan voi lävistysvoima sijaita epäkeskeisesti leikkautuvan alueen painopisteeseen nähden.

Leikkausraudoitusta käytettäessä lasketaan lävistyskapasiteetti kaavasta 4.6.

$$V = 0,25 \cdot V_c + V_s \leq 2 \cdot V_c \quad (4.6)$$

, missä  $V_s$  on leikkausraudoituksen osuus lävistyskapasiteettia laskettaessa  
 $V_c$  on betonin osuus lävistyskapasiteettia laskettaessa (lasketaan kuten kaavassa 4.3)

Leikkausraudoituksen osuus  $V_s$  voidaan Tiehallinnon julkaisun, Paalulaattojen ja paaluhattarakenteiden suunnitteluohje, mukaan laskea kaavasta 4.7.

$$V_s = A_{sv} \cdot f_{yd} \cdot \sin \alpha \quad (4.7)$$

, missä  $A_{sv}$  on leikkausraudoituksen poikkipinta-ala  
 $\alpha$  on leikkausraudoituksen kulma kuvassa 4.7 esitettyä leikkauskartiota vastaan  
 $f_{yd}$   $\leq 300 \text{ N/mm}^2$

### 4.3.5 Taivutus

Laatan taivutustarkastelu suoritetaan murtorajatilamitoituksena, jossa mitoituksuormaksi valitaan julkaisun: Paalulaattojen ja paaluhattarakenteiden suunnitteluohje, mukaan määräävä arvo kaavojen 4.8, 4.9 ja 4.10 perusteella.

$$q_d = 1,2 \cdot \sum g_i + 1,8 \cdot q_{lk1} \quad (4.8)$$

$$q_d = 1,2 \cdot \sum g_i + 1,4 \cdot q_{ek1} \quad (4.9)$$

$$q_d = 1,35 \cdot \sum g_i \quad (4.10)$$

, missä  $\sum g_i$  ovat pysyvät kuormat (laatta, penger- ja tukikerroskuorma)  
 $q_{lk1}$  on liikennekuorma  $Lk1$   
 $q_{ek1}$  on erikoiskuorma  $Ek1$

Ratarakenteissa vastaavaksi murtorajatilan kuormayhdistelmäksi valitaan määräävämpi vaikutus kaavoista 4.11 ja 4.12.

$$q_d = 1,2 \cdot \sum g_i + 1,6 \cdot \sum q_{ju} + 1,0 \cdot q_{kalt} + 0,8 \cdot q_{tuuli} \quad (4.11)$$

$$q_d = 1,35 \cdot \sum g_i \quad (4.12)$$

, missä	$\sum q_{ju}$	on junakuorma lisineen (pystykuorma, keskipakokuorma, sivukuorma ja jarrukuorma)
	$q_{kalt}$	on paalujen kaltevuuspoikkeamakuorma
	$q_{tuuli}$	on tuulikuorma

Ratahallintokeskuksen julkaisun: Oikorata Kerava – Lahti, Paalulaattojen suunnittelu- ja rakentamisohje, mukaan paalujen kaltevuuspoikkeamasma aiheuttaa vaakakuorman. Julkaisuun liittyvässä tyyppilaatan suunnittelussa käytetään vaakakuormituksen pituus- ja poikkisuuntaan kaavasta 4.13 laskettavaa arvoa.

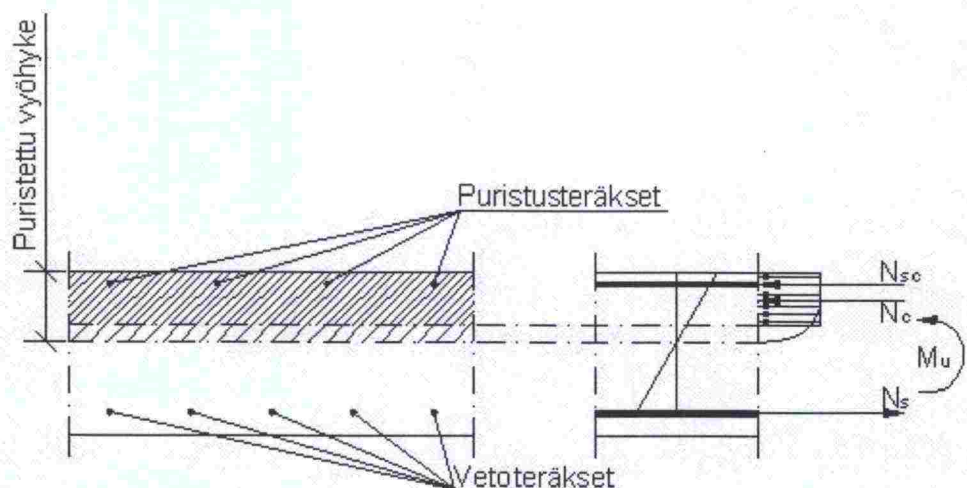
$$q_{kalt} = 0,005 \cdot G \quad [\text{kN/m}] \quad (4.13)$$

, missä  $G$  on laatan, penkereen ja tukikerroksen metripaino

Laatan taivutuskapasiteettia laskettaessa on huomioitava Suomen rakentamismääräyskokoelman betonirakenteita koskevat määräykset ja ohjeet.

Mitoitettaessa rakennetta taivutuksen suhteen oletetaan sienilaatassa laatan tehollisen poikkileikkauksen muuttuvan enintään 1:3 viisteellä. Poikkileikkauksen tehollinen korkeus on paalun kohdalla kuitenkin enintään sienen todellinen korkeus vähennettynä paalun upotussyvyydellä. Laatan voimasuureita laskettaessa käytetään laatan todellisten paksuuksien mukaisia jäykkyyksiä ja olettaen betoni halkeilemattomaksi.

Laskennallisesti paalulaatta vastaa vetoraidoitettua rakennetta, kun laatas-  
sa on ainoastaan laatan poikkileikkauksen vedetylle vyöhykkeelle sijoittuva rauditus. Puristusraudoitetusta rakenteesta puhutaan, kun vetoraidoituk-  
sen lisäksi paalulaatan poikkileikkauksen puristusvyöhykkeelle on sijoitettu rauditus. Asiaa on havainnollistettu kuvassa 4.8.



Kuva 4.8. Periaate paalulaatan poikkileikkauksen jännitysjaumasta.

Kuvassa 4.8 kerroin  $N_{sc}$  kuvaa puristusterästen puristusvoimaa ja kerroin  $N_s$  vetoterästen vetovoimaa. Kerroin  $N_c$  kuvaa betonin puristusresultanttia.



Paalulaatassa vaikuttava taivutusmomentti ei paalulaatan missään osassa saa ylittää paalulaatan poikkileikkauksen momenttikapasiteettia  $M_u$ . Tarkastelu taivutuksen suhteen pitää paalulaatassa rakenteen toiminnasta johtuen tehdä sekä laatan pituus- että poikkisuunnassa. Myös paalulaatassa mahdollisesti vaikuttavan väännön  $M_{xy}$  on pysyttävä rakenteen kestävyysrajoissa. Rakenne tarkastetaan tällöin yhdistetyille rasituksille Suomen rakentamismääräyskokoelman betonirakenteita koskevien määräysten mukaan.

#### 4.3.6 Halkeilu

Paalulaatta mitoitetaan halkeilun suhteen käyttötilassa. Tällöin mitoituksessa käytettävät kuormitukset lasketaan lyhytaikaisten kuormien perusteella kaavasta 4.14 ja pitkäaikaisten kuormien perusteella kaavasta 4.15.

$$q_d = \sum g_i + q \quad (4.14)$$

$$q_d = \sum g_i + 0,3 \cdot q \quad (4.15)$$

Kaavoissa 4.14 ja 4.15 kerroin  $g_i$  on pysyvä kuormakomponentti ja  $q$  liikennekuormituksesta aiheutuva muuttuva kuormakomponentti. Pitkäaikaiskuormien laskennassa Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaan liikennekuorman pitkäaikaisosuutena huomioidaan 30 prosenttina liikennekuormasta kaavan 4.15 mukaisesti.

Betoninormit 2004, mukaan halkeaman ominaisluokituksen pitää raskuusluokassa XC2 kun rakenteen suunnittelukäyttöikä on 50 vuotta, pitkäaikaiskuormien osalta täyttää yhtälön 4.16 ja lyhytaikaiskuormien osalta yhtälön 4.17 ehdot.

$$w_k \leq 0,2 \text{ mm} \quad (4.16)$$

$$w_k \leq 0,3 \text{ mm} \quad (4.17)$$

Koska paalulaattarakenteen käyttöikä on 100 vuotta, pitää Betoninormien 2004 mukaan sallittua halkeamaleveyttä pienentää taulukoiden 4.1 ja 4.2 mukaan.

*Taulukko 4.1. Suurin sallittu halkeamaleveys [mm] eri käyttöiän suunnitteluarvoilla kun perusvaatimus 50 vuoden käyttöiällä on 0,2 mm. /1/*

betonipeite [mm]	$w_{k50}$ [mm]	$w_{k100}$ [mm]
50	0,20	0,14
40	0,20	0,14
35	0,20	0,14
30	0,20	0,13
25	0,20	0,12

Taulukko 4.2. Suurin sallittu halkeamaleveys [mm] eri käyttöiän suunnitteluarvoilla kun perusvaatimus 50 vuoden käyttöiällä on 0,3 mm. /1/

betonipeite [mm]	$w_{k50}$ [mm]	$w_{k100}$ [mm]
50	0,30	0,21
40	0,30	0,20
35	0,30	0,20
30	0,30	0,19
25	0,30	0,17

Jos betonipeitteen vähimmäisarvo (nimellisarvo – sallittu mittapoikkeama) on suurempi kuin rasiitusluokan ja käyttöiän vaatima, saadaan vaadittu halkeamaleveys kertoa luvulla  $\frac{c_{tod}}{c_{min}} \leq 1,5$

$$\frac{c_{tod}}{c_{min}} \leq 1,5$$

, missä  $c_{tod}$  on halkeilutarkasteluissa käytetty betonipeitteen vähimmäisarvo  
 $c_{min}$  on rasiitusluokan ja käyttöiän vaatima betonipeitteen vähimmäisarvo

Tällöin sallittu halkeamaleveys  $w_{ksall}$  voidaan antaa kaavalla 4.18.

$$w_{ksall} \leq \left( \frac{c_{tod}}{c_{min}} \right) \cdot w_{k100} \quad (4.18)$$

Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnitteluohjeen määrittäminen halkeilun mitoittamiselle poikkeaa edellä esitetystä. Kaavan 4.30 kertoimena  $w_{k100}$  käytetään pitkäaikaiskuormien osalla arvoa 0,2 mm ja lyhytaikaiskuormien osalla arvoa 0,3 mm, jotka vastaavat Betoninormit 2004 mukaan 50 vuoden käyttöikävaatimusta. Erot pitkäaikais- ja lyhytaikaiskuormille sallituissa halkeamaleveyksissä johtuvat uudistetusta vuonna 2004 voimaan astuneista Suomen rakentamismääräyskokoelman betonirakenteita koskevista määräyksistä. Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnitteluohje pohjautuu vuonna 2000 voimaan astuneisiin RakMk määräyksiin. Muutoksia on tapahtunut mm. sementin luokitukseen, säilyvyysvaatimuksiin ja laadunvalvontaohjeisiin liittyvissä määräyksissä.

Paalulaatassa halkeaman ominaisleveys lasketaan kaavasta 4.19.

$$w_k = \varepsilon_s \cdot \left( 3,5 \cdot c + k_w \cdot \frac{\varnothing}{\rho_r} \right) \quad (4.19)$$

, missä  $\varepsilon_s$  on raudituksen venymä käyttötilassa  
 $c$  on pääraudoituksen betonipeitteen vähimmäisarvo taivutussuunnassa  
 $k_w$  on 0,085 (A500HW, A700HW, B500K, B600KX ja B700K)  
 $\varnothing$  on keskimääräinen tangon tai janteen halkaisija  
 $\rho_r$  on  $\frac{A_s}{A_{ce}}$



Raudoituksen venymänä käyttötilassa  $\varepsilon_s$  voidaan halkeilleilla betonirakenteilla käyttää raudoituksen keskimääräistä venymää  $\varepsilon_{sm}$ .

Pinta-alaan  $A_{ce}$  lasketaan se poikkileikkauksen vetovyöhykkeen alue, jota rajoittavat suorat matkan  $7,5 \cdot \varnothing$  päässä yksittäisen tangon tai janteen keskipisteestä. /16/ Pääraudoituksen betonipeitteen vähimmäisarvo valitaan paalun rasitusluokan mukaan.

## 5. PAALUPERUSTUKSEN SUUNNITTELU

### 5.1 Noudatettavat ohjeet

Tiehallinnon ja Ratahallintokeskuksen suunnitteluohjeet viittaavat paalujen mitoituksen ja paalutustyön osalta yleisesti Lyöntipaalutusohjeeseen vuodelta 1987 (LPO-87). Paalutuskalusto on kuitenkin ajan myötä kehittynyt niin, että paalutuskoneiden lyöntivoima on kasvanut. Paalutus on samanaikaisesti siirtynyt entistä huonommin rakennettaville pehmeikköalueille. Lisäksi dynaamisista koekuormituksista kertynyt tieto ja kokemus viimeisen 10 vuoden ajalta ovat lisänneet tietoa paalussa lyönnin aikana vaikuttavista jännityksistä. Yhdessä nämä muutokset ovat aiheuttaneet tarpeen luoda uusi Lyöntipaalutusohje (LPO-2005). Keväällä 2004 lausuntokierrokselle lähetetty uusi Lyöntipaalutusohje valmistunee kesällä 2005.

Tämän julkaisun viittaukset teräsbetonipaalujen mitoitukseen ja paalutustyön suorittamiseen pohjautuvat pääosin uuteen Lyöntipaalutusohjeeseen (LPO-2005) /12/, joita voidaan soveltuvin osin käyttää myös muilla paaluilla siihen asti, kun Pienipaalutusohjeet valmistuvat.

Teräsputkipaalujen osalta viitataan Tielaitoksen julkaisuun: Teräsputkipaalut, sekä Rautaruukin julkaisuun: RR-paalutusohjekirja. /24/, /9/ Porapaalujen osalta viitataan Tiehallinnon julkaisuun: Porapaalutusohje. /19/

### 5.2 Pohjatutkimukset

Lyöntipaalutusohjeen (LPO-2005) mukaan pohjatutkimukset on ulotettava niin syvälle, että kaikki maapohjassa olevat kerrostumat, joilla voi olla vaikutusta rakenteisiin, paalujen asentamiseen ja kantavuuteen tai maapohjan muodonmuutosominaisuuksiin, saadaan selvitettyä. Pohjatutkimukset on ulotettava niin laajalle alueelle, että maapohjan geotekniset ominaisuudet saadaan selvitettyä paalutuksen koko vaikutusalueella. Paalutuksen vaikutusalueen ohjeellinen laajuus ulottuu vähintään paalun pituuden verran paalutuksen ulkopuolelle. /12/

Maapohjan geotekniset ominaisuudet on tutkittava paalutuksen koko vaikutusalueelta, jotta voitaisiin varmistua paalutuksen alueellisesta vakavuudesta.

Perustettaessa paalulaattarakenne tukipaalujen varaan on kairaukset ulotettava kallion pintaan tai kiinteään pohjakerrokseen ja selvitettävä sekä läpäisytävien maakerrosten että pohjakerroksen pääpiirteittäinen rakenne. Kallion pinnan sijainti ja muoto on selvitettävä erityisesti silloin, kun paalujen alapäähän kohdistuu liukumisvaara.

Tukipaaluperusteisen paalulaattarakenteen pohjatutkimukset suoritetaan yleensä sekä paino- että heijarikairauksin. Kallioon tukeutuvia paaluja käytettäessä pitää kallion pinta lisäksi selvittää porakonekairauksin.

Perustettaessa paalulaattarakenne kitkapaaluja käyttäen, selvitetään maakerrosten väliset rajat ja maakerrosten ominaisuudet kuten rakeisuus ja ra-



kenteellinen tiiviys sekä paaluilla läpäistävien kerrosten että varsinkin toimivaksi suunnitellun maakerroksen osalta. /12/

Kitkapaaluilla perustettavan paalulaattarakenteen pohjatutkimuksiin suositellaan erityisesti puristinkairausta.

Pohjatutkimukset pitää paalulaattarakenteen osalta suorittaa riittävän ajoissa ja riittävän kattavina, jotta huolelliselle ja luotettavalle suunnittelulle jää riittävästi aikaa ja jotta rakenne voidaan toteuttaa mahdollisimman taloudellisesti.

## 5.3 Paalutyypit

### 5.3.1 Betonipaalut

Betonipaaluilla tarkoitetaan Lyöntipaalutusohjeissa (LPO-2005) käsiteltyjä poikkileikkaukseltaan massiivisia vähintään  $250 \times 250 \text{ mm}^2$  ja enintään  $350 \times 350 \text{ mm}^2$  teräsbetonisia paaluelementtejä. Lyöntipaalutusohjetta (LPO-2005) voidaan soveltuvin kohdin noudattaa myös käytettäessä poikkileikkaukseltaan muita paalukokoja, mutta tällöin on ainakin paalujen rakennetta ja lyöntiä koskevat ohjeet selvitettävä kussakin tapauksessa erikseen.

Teräsbetonipaalu on Suomessa yleisin paalulaattarakenteissa käytetty paalutyyppi. Suunnittelussa pitää kuitenkin huomioida teräsbetonipaalun soveltuvuus käyttökohteeseen pohjatutkimuksilla saatujen tietojen perusteella. Teräsbetonipaalulle vaihtoehtoisten paalutyyppien käyttö on teknisesti perusteltua, silloin:

- kun teräsbetonipaalun tunkeutumisesta tavoitetasoon ei voida varmistua
- kun on syytä olettaa teräsbetonipaalujen vaurioituvan
- kun paalun alapäähän kohdistuu liukumisvaara
- kun paalun aiheuttama maan syrjäytyminen aiheuttaa ongelmia alueelliselle vakavuudelle tai viereisille rakenteille

Myös erittäin pehmeät tai eloperäiset pintakerrokset suosivat teräsbetonipaalulle vaihtoehtoisten paalutyyppien käyttöä, koska teräsbetonipaalun lyönneissä käytettävän raskaan lyöntikaluston liikkuminen paalutusalueella saattaa aiheuttaa aiemmin lyötyjen paalujen yläpäiden siirtymiä.

Ratahallintokeskuksen julkaisu: RMYTL 3, Perustamis- ja vahvistamistyöt, määrittää ratojen paalulaattarakenteissa käytettävien teräsbetonipaalujen poikkileikkaukset seuraavasti: Perustuksissa käytettävien teräsbetonipaalujen poikkileikkaus voi olla  $300 \times 300 \text{ mm}^2$  tai  $350 \times 350 \text{ mm}^2$ . Työkohteessa käytettävä paalu on esitettävä työkohtaisessa työselityksessä. /7/

Tiehallinnon julkaisu: Paalulaattojen ja paaluhattarakenteiden suunnitteluohje, puolestaan ohjeistaa paalukoon valintaa seuraavasti: Paalulaatan teräsbetonipaalujen tavallisin paalukoko on  $300 \times 300 \text{ mm}^2$ . /18/

Aiemmin laajemmin käytetyn  $250 \times 250 \text{ mm}^2$  paalukoon käyttöä ei suositella, koska paalukoon hoikkuus aiheuttaa työmaaolosuhteissa usein jo pitkien

paalujen pystyyn noston osalta sallitun halkeamaleveyden ylittäviä halkeamia.

Betonipaalut mitoitetaan yleensä Lyöntipaalutusohjeen (LPO-2005) mukaisesti paalutusluokissa Ib tai II. /12/

Yleisvaatimukset paalumateriaaleista Lyöntipaalutusohje (LPO-2005) määrittää seuraavasti: Kaikkien paaluissa käytettävien materiaalien ja varusteiden pitää olla niitä koskevien Suomen rakentamismääräyskokoelman (RakMK) ja SFS-EN – standardien vaatimusten mukaisia. Paalun on kestävä riittävässä varmuudella sille tulevat kuormitukset sekä nostojen, kuljetuksen ja lyöntin aiheuttamat rasitukset. /12/ Teräsbetonipaaluille asetetaan 100 vuoden käyttöikävaatimus.

Paalujen valmistusta raudoituksen ja betonoinnin osalta koskevat määräykset, paalujen sallittuja mittapoikkeamia, paalujatkoksia ja paalun päiden lisäraudoitusta sekä paalun kärjen suojaamista koskevat määräykset on esitetty julkaisussa Lyöntipaalutusohje 2005 (LPO-2005).

### **5.3.2 Teräsputkipaalut**

Teknisesti perusteltu käyttö teräsputkipaaluille esitetään Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnitteluohjeessa seuraavasti: Teräspaaluja voidaan käyttää vaikeissa pohjasuhteissa, kun teräsbetonipaalut helposti rikkoutuvat, paalujen sijaintipoikkeamia ei pystytä hallitsemaan tai teräsbetonipaalujen tunkeutuminen tavoitetasoon ei onnistu. /18/ Lisäksi esimerkiksi RR-paaluissa on mekaaniset jatkokset, jolloin katkaistut ”kannot” voidaan käyttää hyväksi.

Teräsputkipaalujen käyttö on teknisesti perusteltua myös kohteissa, jossa maan pintakerrokset ovat erittäin pehmeitä tai eloperäisiä. Erityisesti pienten teräsputkipaalujen lyöntikalusto on teräsbetonipaalun lyöntikalustoa huomattavasti kevyempi, jolloin riski jo lyötyjen paalujen siirtymille paalutuskoneen liikkua paalutusalueella on pienempi. Paalutustyö voidaan kevyemmän paalutuskaluston ansiosta mahdollisesti myös suorittaa ohuempaa työalustaa käyttäen. Lisäksi paalun maata syrjäyttävä vaikutus on huomattavasti esimerkiksi teräsbetonipaalua vähäisempää.

Lyötävinä pieninä teräsputkipaaluina Tiehallinnon julkaisu: Geotekniset laskelmat, esittää kaupallisessa valmistuksessa olevat paalut, kuten RR-paalu, X-paalu ja G-paalu. Näistä Suomessa yleisimmin käytetty on RR-paalu.

Lyötävien pienten teräsputkipaalujen kestävydestä johtuen paalujen siirto, varastointi ja käsittely ovat työmaaolosuhteissa teräsbetonipaaluja huomattavasti nopeampaa. Tällöin myös paalutustyön nopeudella voidaan tapauskohtaisesti saavuttaa huomattavaa taloudellista etua.

RR-paalutusohjekirjan mukaan voidaan paalulaattarakenteen paalutus suunnitella paalutusluokkaan II tai IB. RR-paalun suositeltavana minimikokona paalulaattarakenteessa voidaan pitää RR115/8. Lyötävät pienet teräsputkipaalut suunnitellaan yleensä tiiviin moreenin tai kallion varaan tukeutuviksi tukipaaluiksi.



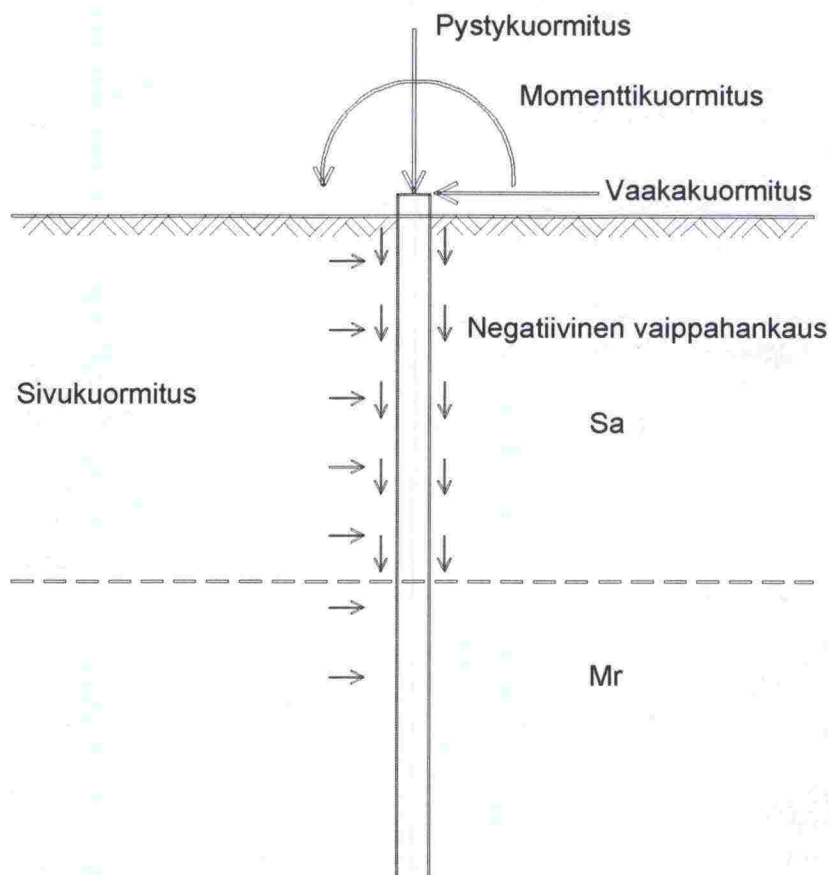
Suurempien, halkaisijaltaan yli 300 mm, teräsputkipaalujen käyttö paalulaattarakenteessa tulee kyseeseen lähinnä palkkilaattoja käytettäessä, jolloin paalujen suurella kantokyvyllä saavutetaan palkkien osalta oleellisesti suuremmat paaluvälit ja edelleen säästöä paalujen materiaali- ja asennuskustannuksissa.

Kun kallion pinta on viettävä, eikä paalujen alapään tuennasta paalun liukumista vastaan voida varmistua, suositellaan paalulaattarakenne perustettavaksi porapaaluilla.

## 5.4 Paalujen kuormat

### 5.4.1 Kuormat

Paalun mitoituksessa pitää huomioida paaluun kohdistuvat Lyöntipaalu-tusohjeen (LPO-2005) mukaiset seuraavat kuormitukset: pystykuormitus, vaakakuormitus, momenttikuormitus, sivukuormitus ja negatiivinen vaippahankaus. Kuvassa 5.1 on esitetty paaluun kohdistuvat ulkoiset kuormitukset.



Kuva 5.1. Paaluun vaikuttavat ulkoiset kuormitukset. /12/

### **5.4.2 Pystykuormat**

Teräsbetonipaalut on ensisijaisesti suunniteltava vastaanottamaan paalun suuntaista puristusta. Lyöntipaalutusohjeen (LPO-2005) mukaan pysyvää pystykuormitusta voidaan siirtää vain karkearakeisiin maakerroksiin, moreenikerroksiin tai kalliolle. Hetkellisiä pystykuormituksia voidaan siirtää muihinkin maakerroksiin /12/.

Näin ollen savi-, turve- tai liejupehmeiköille perustettavat paalulaattarakenteet, jotka pengerkuormineen aiheuttavat pysyviä pystysuuntaisia kuormituksia, on käytännössä perustettava kovaan pohjaan tukeutuvin tukipaaluin. Eri-tyistapauksissa, kun pehmeiden maakerrosten välissä sijaitsee riittävän paksu, sopivan raekoon ja tiiveyden omaava karkearakeinen maakerros tai moreenimaakerros voidaan paalulaattarakenne perustaa myös kitkapaaluja käyttäen.

Lyöntipaaluihin ei saa kohdistua pysyvää vetokuormitusta hienorakeisten ja eloperäisten maakerrosten osuudella, mutta kylläkin hetkellistä vetokuormitusta.

### **5.4.3 Vaaka- ja momenttikuormitukset**

Paalutuksen suunnittelu vaaka- ja momenttikuormitusten osalta on Lyöntipaalutusohjeen (LPO-2005) mukaan määritetty seuraavasti: Vaakakuormituksia ja momenttikuormituksia voidaan siirtää hoikilla betonipaaluilla vain vähäisessä määrin, koska ne jakautuessaan maakerroksiin aiheuttavat paaluille taivutusrasituksia, joita hoikat betonipaalut kestävät huonosti. /12/

Paalulaattarakenteessa kuvassa 5.1 esitettyjä vaakakuormituksia paaluille aiheuttavat lähinnä penkereen vaakasuora maanpaine, kaarteissa keskipakovoima, raideliikenteen sivusysäykset, kiihdytykset ja jarrutukset sekä tuulikuorma.

Paalulaattarakenteen paaluihin kohdistuvat vaakavoimat voidaan vastaanottaa vinopaaluja tai pystypaalujen sivuvastusta hyväksi käyttämällä. Mikäli vaakavoimat vastaanotetaan vinopaaluilla, pitää vinopaalujen olla kuormitettuja siten, että niihin ei kohdistu vetoa eri kuormitusyhdistelmien vaikuttaessa. Käytettäessä paalulaattarakenteessa pelkkiä pystypaaluja, pitää puolestaan niiden riittävästä sivutuennasta varmistua.

Varsinaisia kuvassa 5.1 esitettyjä paalun yläpäähän kohdistuvia momenttikuormituksia ei paalulaattarakenteen paaluihin, paalulaatan toimitavasta johdun yleensä synny. Kuitenkin tapauksessa, jossa paalun raudoitus on ankuroitu paalulaattaan, saattaa paaluun epäkeskeisestä kuormituksesta aiheutua kuvan 5.1 mukaista paalun yläpään momenttikuormitusta.

Paalulaattarakenteessa yksittäisen paalun momenttikuormitus aiheutuu yleensä paalun käyryydestä, paalun yläpään vaakakuormituksesta sekä maan paaluun kohdistamasta sivukuormituksesta. Vinopaaluille momenttikuormituksia voi lisäksi aiheuttaa mahdollinen negatiivinen vaippahankaus. Paalulaattarakenteessa paalun rasituksen kannalta merkittävin momenttikuormitus esiintyy yleensä pehmeässä maakerroksessa, missä maan paalua tukeva vaikutus on vähäisin.



Yhteenvedona Lyöntipaalutusohje (LPO-2005) määrittää paaluille tavutusrasituksia aiheuttavat tekijät:

- kaivu paalutusalueella tai sen lähellä,
- paalutusalueella liikkuvat työkoneet, esimerkiksi paalutuskoneet, kairavinkoneet ja nosturit,
- paalun suuntaisen kuorman epäkeskisyys,
- maan painuminen vinopaalujen ympärillä, mistä syystä vinopaalujen käyttöä on vältettävä aina, kun se on mahdollista,
- paalun käyryys, jota erityisesti aiheuttavat:
  - paalujen käsittely työmaalla; varastointi, pystyyn nosto
  - epäkeskeinen lyönti,
  - lyönti paksun täyterokoksen läpi, jossa paalua käyristäviä kiviä ja lohkareita ja muita esteitä,
  - moreenin yläosan lohkareet,
  - luistaminen vinolla kallion pinnalla.

Koska paalujen taivutusrasitusten tarkka ennakkointi on vaikeaa, teräsbetonipaaluille sallitaan puristusta sen verran, että paalujen taivutuskestävyys on suurimmillaan. /12/

#### 5.4.4 Sivukuormitus

Lyöntipaalutusohjeiden (LPO-2005) mukainen määritelmä sivukuormitukselle ja sen huomioimiselle on seuraava: Sivukuormitusta paaluille syntyy käytettäessä paalun tai paaluryhmän sivukapasiteettia tai momenttikapasiteettia hyväksi tai maan liikkeessä paaluja kohti, mikä voi aiheutua huonosta alueellisesta tai paalutusalueen vakavuudesta tai paalutuksen aiheuttamista maan siirtymistä. Kaikki edellä mainitut tekijät aiheuttavat paalulle taivutusrasituksen, joka on otettava huomioon paalun rakenteellisessa mitoituksessa. /12/

Paalulaattarakenteiden osalta paaluihin kohdistuvaa sivukuormitusta kohdistuu yleensä eniten paalulaatan reunimmaisille paaluille. Yleisimpinä syinä mainittakoon kaivu tai läjitys laatan reuna-alueilla ja tie-, katu- tai ratarakenteen levittämisen yhteydessä paalutuksesta tai maan painumisesta aiheutuva, vanhan laatan reunapaaluille kohdistuva maanpaine. Huono alueellinen vakavuus aiheuttaa paaluille sivukuormitusta koko paalulaatan alueella.

#### 5.4.5 Negatiivinen vaippahankaus

Lyöntipaalutusohjeen (LPO-2005) mukaan paaluja kuormittava negatiivinen vaippahankaus määritetään seuraavasti: Negatiivinen vaippahankaus syntyy, kun maa paalun ympärillä painuu enemmän kuin paalu. Painuma saattaa aiheutua täyteesta, pohjaveden alenemisesta tai itse paalutustyöstä. Paalulle negatiivisesta vaippahankauksesta tuleva lisäkuorma on otettava huomioon paalun sallittua geoteknistä ja rakenteellista kantavuutta määritettäessä. /12/

Negatiivinen eli paalua kuormittava vaippahankaus syntyy hienorakeisten tai eloperäisten maakerrosten kokoonpuristuessa. Lyhytaikainen kuorma ja negatiivinen vaippahankaus eivät vaikuta samanaikaisesti. /12/

Paalulaattarakenteissa paalua kuormittava negatiivinen vaippahankaus aiheutuu yleensä paalutuskoneen työalustan sekä paalulaatan valualustan painumasta. Myös mahdollinen paalutustyöstä ensin aiheutuva maan kohoaminen ja edelleen maan konsolidaation edetessä tapahtuva maan painuminen aiheuttaa paalulaattarakenteen paaluille negatiivista vaippahankautta. Negatiivinen vaippahankaus voidaan tällöin laskea esimerkiksi ottamalla huomioon puolet suljetusta leikkauslujuudesta ( $s_u/2$ ).

Lyöntipaalutusohjeen (LPO-2005) mukaan negatiivisen vaippahankauksen aiheuttamaa paalun tai paaluryhmän lisäkuormaa laskettaessa voidaan negatiivisen vaippahankauksen otaksua mobilisoituvan sellaiseen syvyyteen saakka, missä paaluja ympäröivän maakerroksen painuma on 5 mm suurempi kuin paalun painuma.

Negatiivista vaippahankausta määritettäessä paaluja ympäröivän maakerroksen painuma voidaan laskea konsolidaatiopainumana huomioiden maan kerrosten väliset muodonmuutosparametrien vaihtelut. Tukipaalun painuma  $S_p$ , joka muodostuu paalun kimmoisesta kokoonpuristumasta  $S_e$  sekä paalukärjen alla tapahtuvasta painumasta  $S_s$  voidaan puolestaan laskea kaavan 5.1 mukaisesti.

$$S_p = S_e + S_s = \frac{N \cdot L}{E_p \cdot A_p} + \frac{N \cdot d}{E_s \cdot A_p} = \frac{N \cdot L}{E_p \cdot A_p} + \frac{N}{K} \quad (5.1)$$

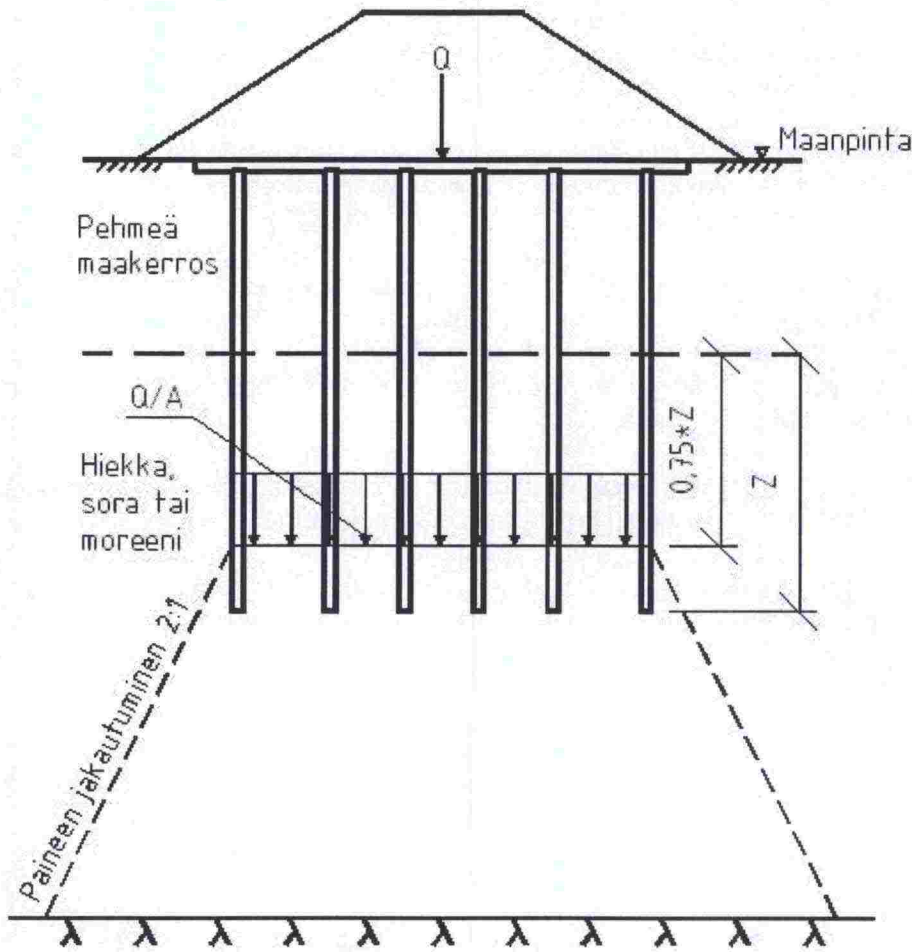
, missä	N	on paaluun kohdistuva pystykuormitus (N)
	L	on paalun pituus (mm)
	d	on paalun halkaisija (mm)
	$A_p$	on paalun poikkileikkausala (mm <sup>2</sup> )
	$E_p$	on paalun kimmomoduuli (MPa)
	$E_s$	on paalun kärjen alapuolisen kerroksen kimmomoduuli (MPa)
	K	on kärjen geotekninen jousivakio (MN/m)

Hankkeeseen Oikorata Kerava-Lahti liittyvässä tyyppilaattojen suunnitteluohjeen liitteessä moreenikerrokseen tukeutuvan tukipaalun painuma on laskettu käyttäen paalun kimmomoduulina  $E_p = 34000$  MPa ja kärjen geoteknisenä jousivakiona  $K = 250$  MN/m. Lyöntipaalutusohje (LPO-2005) puolestaan suosittelee paalunkärjen alapuolisen kimmomoduulin arvoksi hiekalla ja soralla 1000 – 2000 MPa ja moreenilla 1000 – 3000 MPa. Maan tiivistyminen lyöntin vaikutuksesta kärjen alla voidaan ottaa huomioon kärjen alapuolelle syvyydelle 3 kertaa paalun sivumitta /12/. Teräsbetonisen tukipaalun painuma on yleensä luokkaa 5 – 10 mm.

Tukipaaluna toimivan teräsputkipaalun painuma voidaan laskea edellä esitetyn kaavan 5.1 mukaisesti. Paalun kimmomoduulina käytetään tällöin teräksen kimmomoduulia, 200 GPa.

Julkaisun: Teräsputkipaalut, mukaan kitkapaaluryhmien painuma voidaan laskea kuvan 5.2 mukaista mallia käyttäen. Tällöin maakerrosten kokoonpuristuvuusmoduulit määritetään kuten luonnontilaisten maakerrosten kokoonpuristuvuusmoduulit. /24/





Kuva 5.2. Kitkapaaluryhmän painuman laskeminen. /24/

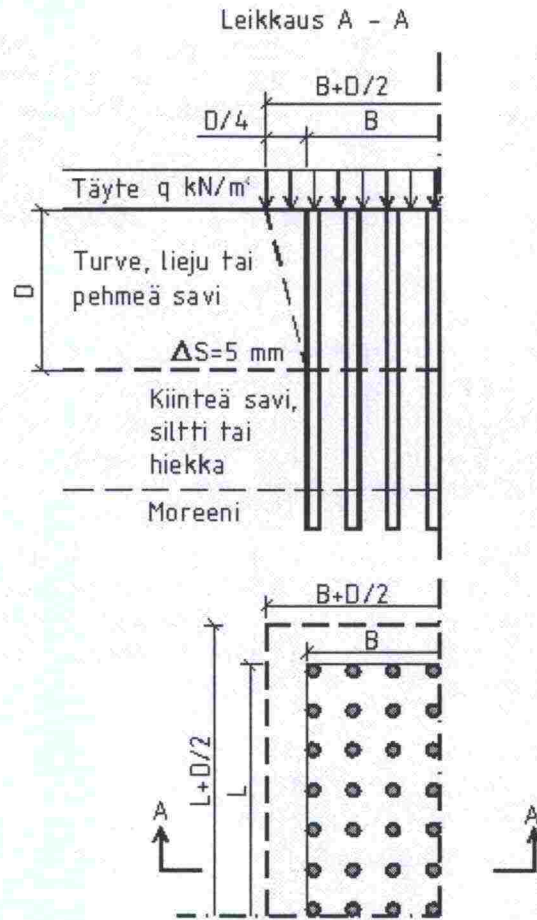
Kuvan 5.2 mukaista mallia käytettäessä täytyy kohteen pohjasuhteiden olla homogeenisia koko paalutettavalla alueella.

Paalulaatan paaluperustuksen kokonaislisäkuorma,  $P_{neg}$ , voidaan laskea kaavojen 5.2 ja 5.3 sekä kuvan 5.3 perusteella. Paaluperustuksen mitoituksessa voidaan käyttää pienempää näin saaduista arvoista. Yksittäisen paalun lisäkuorma saadaan jakamalla kokonaiskuorma paalujen lukumäärällä.

$$P_{neg} = \frac{B \cdot L \cdot q + 2 \cdot (B + L) \cdot D \cdot s_u}{n} \quad (5.2)$$

$$P_{neg} = \frac{\left(B + \frac{D}{2}\right) \cdot \left(L + \frac{D}{2}\right) \cdot q}{n} \quad (5.3)$$

Kaavoissa 5.2 ja 5.3 kerroin  $s_u$  on suljettu leikkauslujuus ja kerroin  $n$  paalujen lukumäärä. Loput kaavoissa 5.2 ja 5.3 käytetyt kertoimet on esitetty kuvassa 5.3.



Kuva 5.3. Negatiivisen vaippahankauksen aiheuttaman paaluryhmän kokonaisläsäkuorman laskeminen. /12/

Vaikka paalulaattarakenteen paalut eivät laatan käyttäytymisestä johtuen pystysuunnassa toimi ryhmänä, voidaan paalulaattarakenteen paaluihin kohdistuva, negatiivinen vaippahankaus laskea kuten Lyöntipaalutusohjeissa (LPO-2005) paaluryhmälle on esitetty. Tällöin on kuitenkin huomioitava seuraavassa esitetyt paalulaatan paaluperustukseen liittyvät näkökohdat.

Paalulaattarakenteessa reunapaalujen välinen etäisyys seuraaviin paaluihin voi olla suurempi kuin paaluväli laatan keskiosilla. Tällöin myös negatiivinen vaippahankaus on reunapaaluilla, täytteen aiheuttaman kuormituksen keskittymisen johdosta, paalulaatan muita paaluja suurempaa. Myös mahdollinen paalulaatan ulkopuolisen pengerosan painuminen kasvattaa reunapaaluille kohdistuvaa negatiivista vaippahankausta.

Lopuksi paalun sallittu geotekninen kantavuus on tarkastettava paalua kuormittavien pystykuormitusten summalle kaavojen 5.4 ja 5.5 mukaan.

$$P_{pitkäaik} + P_{neg} \leq P_{sall}, \text{ kun } P_{lyhytaik} \leq P_{neg} \quad (5.4)$$

$$P_{pitkäaik} + P_{lyhytaik} \leq P_{sall}, \text{ kun } P_{lyhytaik} > P_{neg} \quad (5.5)$$



, missä	$P_{neg}$	on paalun negatiivinen vaippahankaus
	$P_{sall}$	on paalun sallittu geotekninen kantavuus
	$P_{pitkäaik}$	on vaikutusajaltaan pitkäaikaiset paalukuormat
	$P_{lyhytaik}$	on vaikutusajaltaan lyhytaikaiset paalukuormat

## 5.5 Paalujen ja paaluryhmien geotekninen mitoitus

### 5.5.1 Tukipaalut

Paalulaattarakenne pitää ensisijaisesti perustaa tukipaaluille. Paalun lyönti tukevaan maapohjaan, joka kaikissa kuormitustapauksissa kestää sille tulevat kuormitukset, pitää paalujen painumat sekä paalujen painumaerot paalulaatan sietämissä rajoissa. Paalulaatalta paalulle siirtyvät pystykuormitukset määrittävät paalun geoteknisen kantavuuden.

Paalun sallittu geotekninen kantavuus määritetään kuormien ominaisarvojen suhteen. Käyttörajatilaa vastaava sallittu geotekninen kantavuus sisältää kantavuuden määrittämismenetelmästä riippuvan kokonaisvarmuuden maapohjan murtoa vastaan. Geotekninen kantavuus esitetään sallittuna keskeisenä puristusjännityksenä.

Lyöntipaalutusohjeen (LPO-2005) mukaan tukipaalun kantokyky määritetään seuraavasti: Teräsbetonipaalun sallittu geotekninen kantokyky saadaan tavallisissa kuormitustapauksissa suunnitella vastaamaan paalulle keskeisenä puristusjännityksenä pienimmässä poikkileikkauksessa:

- paalutusluokassa II enintään  $7 \text{ MN/m}^2$
- paalutusluokassa IB enintään  $9 \text{ MN/m}^2$
- paalutusluokassa IA sallittu geotekninen kantokyky määräytyy kussakin tapauksessa erikseen rakennuspaikan pohjasuhteiden ja paalun rakenteellisen kantokyvyn sekä lyöntityölle asetettavien vaatimusten ja paalutuksen tarkastustoimenpiteiden perusteella

Kantokyvyn määrittämisessä pitää kuitenkin huomioida seuraavat näkökohdat:

- paalutuksen tarkastustoimenpiteet
- vaikeat pohjasuhteet
- paaluryhmän koko
- perustusrakenteen jäykkyyden ja muodon vaikutus
- paalun pituus

Paalutusluokassa II teräsbetonisen tukipaalun geotekninen kantavuus voidaan määrittää edellä esitettyinä keskeisenä puristusjännityksenä, jos loppulyönnit tehdään Lyöntipaalutusohjeessa (LPO-2005) esitettyjen loppulyöntiohjeiden mukaisesti. Tukipaalun geotekninen kantavuus voidaan Lyöntipaalutusohjeen (LPO-2005) mukaan mitoittaa myös kairausvastuksen, maan lujisuuden sekä loppulyöntien tai luotettavan paalutuskaavan perusteella. Näitä menetelmiä, joita rajoitetusti voidaan käyttää myös paalutusluokassa IB, on tarkemmin menetelmiin liittyvine varmuuskertoimineen käsitelty Lyöntipaalutusohjeessa (LPO-2005).

Paalutusluokassa IA ja yleensä myös paalutusluokassa IB tukipaalujen geotekninen kantokyky voidaan määrittää koepaalutuksen sekä dynaamisten ja/tai staattisten koekuormitusten perusteella. Paalun lyötävyyden varmistaminen suunnitteluvaiheessa tehtävillä iskuaaltomallinnuksilla on erittäin suositeltavaa. Tukipaalun kantokyky voidaan määrittää koepaalutuksen sekä dynaamisten ja/tai staattisten koekuormitusten perusteella myös paalutusluokassa II. /12/

Perustettaessa paalulaattarakenne RR-paaluja käyttäen lasketaan paalun geotekninen kantavuus RR-paalutusohjekirjan kappaleiden 7.4.3 ja 7.4.4 mukaisesti.

### 5.5.2 Kitkapaalut

Kitkapaalun käyttö paalulaattarakenteen paaluperustuksena on aina tukipaaluperustusta riskialttiimpi ja vaatii tätä tarkemmat pohjatutkimukset. Koska paalulaatta ei toimi täysin jäykkänä, kuten esimerkiksi sillan maatuki, eivät paalulaattarakenteen paalut toimi pystysuunnassa ryhmänä, vaan yksittäisinä paaluina. Tällöin jokaisen paalun pystysuuntaisesta toiminnasta pitää varmistua siten, että paalun geotekninen kantokyky on riittävä ja että kitkapaaluina toimivien paalujen painumaerot pysyvät laatan kestävyysden sallimissa rajoissa. Koska kitkapaalun painuma muodostuu suurelta osin paalun alapuolisten maakerrosten painumasta, on laaja-alaisen paalulaattarakenteen yksittäisten paalujen painumien laskenta vaikeaa eteenkin pohjasuhteitaan nopeasti muuttuvilla pohjamailla.

Kitkapaalun kantokykyyn vaikuttavat esimerkiksi kantavan maakerroksen tiiveys, paalun kantavaan maakerrokseen tunkeutuvan osan pituus ja muoto sekä paaluryhmän suuruus. /12/

### 5.5.3 Sivusiirtymät ja sivukapasiteetti

Lyöntipaalutusohjeen (LPO-2005) mukaan geotekninen sivukapasiteetti määräytyy siten, että paalu riittävällä varmuudella eri kuormitustapauksissa maan sivutuenta huomioon ottaen kestää sille tulevat sivukuormitukset niin, että paalun siirtymät pysyvät rakenteen sietämissä rajoissa. /12/

Paalun sivukuormitus ja sivuvastus aiheutuvat maan ja paalun liikkeestä toistensa suhteen. Kuormituksesta puhutaan, kun maa kuormittaa paalua. Vastuksesta puhutaan, kun maa vastustaa paalun siirtymää. /12/

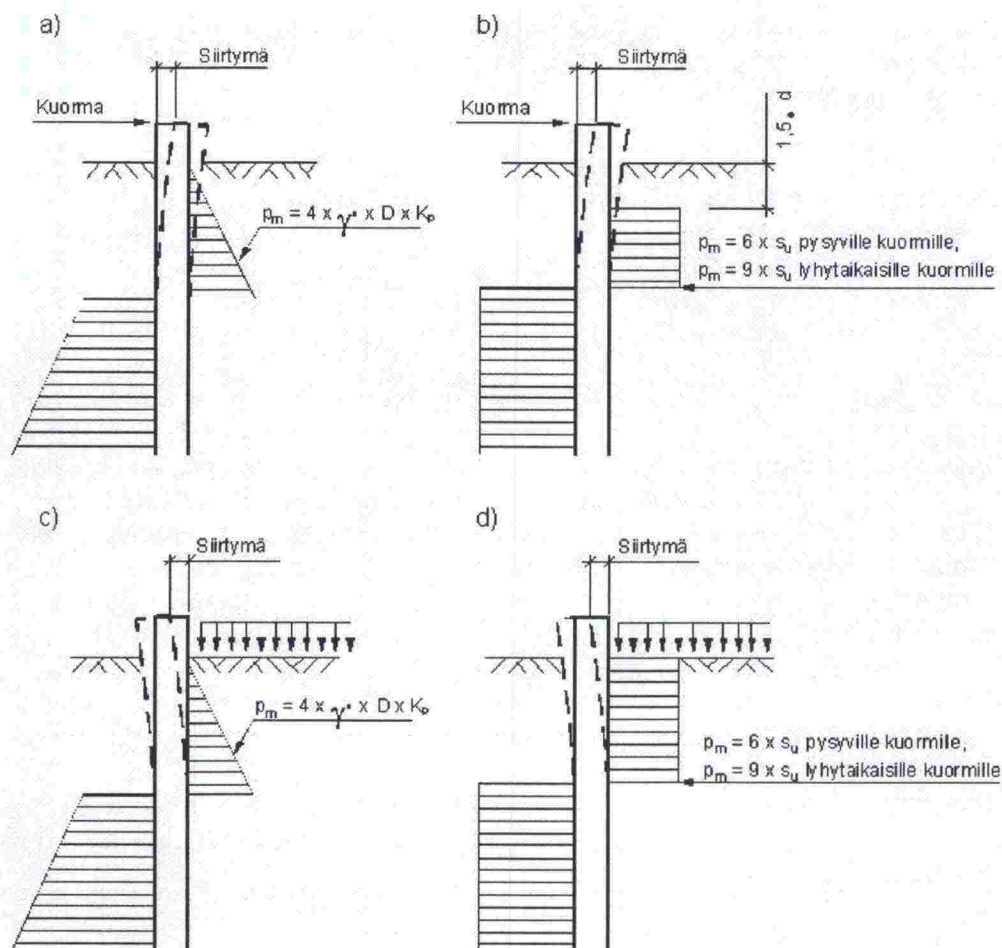
Paalun sivukapasiteettiin vaikuttavat paalua ympäröivien maakerrosten lujuus ja jäykkyys, paalun pään kiinnitysaste sekä paalun oma taivutusjäykkyys. /12/

### Sivuvastuksen ja sivukuormituksen murtoarvot

Karkearakeisessa maassa ja moreenissa sivuvastuksen ja sivukuormituksen murtoarvot voidaan Lyöntipaalutusohjeen (LPO-2005) mukaan laskea kuvan 5.4 kohtien a ja c mukaisesti. Hienorakeisessa maassa sivuvastuksen murtoarvo voidaan olettaa vakioksi syvyydestä riippumatta (kuva 5.4 b). Pinta-



kerros syvyydelle  $1,5 D$  jätetään tällöin ottamatta huomioon. Sivukuorman murtoarvo hienorakeisessa maassa lasketaan puolestaan kuvan 5.4 d esittämällä tavalla. /12/



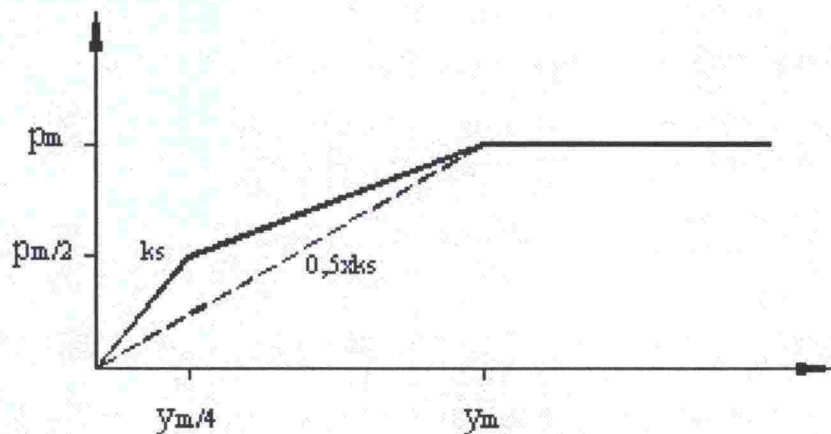
*Kuva 5.4. Sivuvastuksen murtoarvot jäykälle paalulle; a) karkearakeisessa maassa, b) hienorakeisessa maassa ja sivukuormituksen murtoarvot jäykälle paalulle; c) karkearakeisessa maassa, d) hienorakeisessa maassa. /12/*

Kuvassa 5.4 kerroin  $K_p$  on passiivinen maanpainekerroin,  $d$  paalun halkaisija tai sivun pituus,  $\gamma$  maan tehokas tilavuuspaino,  $s_u$  maansuljettu leikkauslujuus ja  $z$  syvyys maanpinnasta.

Käytettäessä maan sivuvastusta hyväksi paalun rakenteellisessa mitoituksessa, pitää varmuuden maan murtumisen suhteen olla vähintään 2,0. /12/

### Paalujen sivuvastus ja sivukuormitus

Lyöntipaalutusohjeen (LPO-2005) mukaan alustaluku- ja moduulimenetelmillä voidaan määrittää kuorman ja siirtymän välinen vuorosuhde. Kuorman ja siirtymän välistä vuorosuhdetta karkearakeisessa maassa on havainnollistettu kuvassa 5.5. Sivukuorma tai sivuvastus ei voi missään tilanteessa ylittää murtotarkastelulla saatua arvoa.



Kuva 5.5. Paalun sivupainesiirtymäyhteys karkearakeisessa maassa. /12/

Paalun sivukapasiteetin ja -siirtymien laskemisessa tarvittavat alustaluvut ja maaparametrit on valittava siten, että niiden epäedullisin vaikutus rakenteen kuormitukseen tulee kussakin suunnittelutilanteessa huomioon otetuksi. Kun kyseessä on paalun mitoittaminen sivukuormaa vastaavalle taivutukselle ja siirtymälle, valitaan vaakasuora alustaluku vaihteluvälin alarajan mukaan. Kun kyseessä on paalun rakenteellisen kestävyysmitoittaminen esimerkiksi kutistuman tai lämpötilan aiheuttamille pakkovoimille, valitaan vaakasuora alustaluku sivuvastuksen laskentaan vaihteluvälin ylärajan mukaan. /12/

Alustaluvut, joihin vaikuttavat myös rakenteen mitat, pitää erittäin vaativassa luokassa AA hienorakeisen maan osalta pitkäaikaisessa kuormitustilanteessa määrittää ödometrikokeella määritetyn kokoonpuristuvuusmoduulin  $M$  kautta, jolloin alustaluku  $k_s$  lasketaan kaavasta 5.6. /12/

$$k_s = \beta \cdot \frac{M}{d} \quad (5.6)$$

, missä  $d$  on paalun halkaisija tai sivumitta

Kaavassa 5.6 kertoimena  $\beta$  voidaan savelle käyttää arvoja 0,46...0,74 Poissonin vakion vaihdellessa vastaavasti 0,4...0,3. Siltile kertoimen  $\beta$  arvoiksi voidaan valita 0,62...0,83 Poissonin vakion vaihdellessa välillä 0,35...0,25. /12/

Erittäin vaativassa luokassa AA hienorakeisen maan alustaluku lyhytaikaisessa kuormitustilanteessa määritetään suljetun tilan kimmomoduulin  $E_u$  kautta, joka määritetään suljetulla kolmiakσιαalikokeella. /12/ Alustaluku  $k_s$  lasketaan näin ollen kaavan 5.7 mukaan. /12/

$$k_s = \frac{E_u}{d} \quad (5.7)$$

Erittäin vaativassa luokassa AA määritetään alustaluku  $k_s$  karkearakeisessa maassa kokoonpuristuvuusmoduulin  $M$  tai avoimen tilan kimmomoduulin  $E_d$



avulla kaavan 5.8 esittämällä tavalla. Kokoonpuristuvuusmoduuli  $M$  ja avoimen tilan kimmomoduuli  $E_d$  määritetään ödometri- tai kolmiaksaalikokein. /12/

$$k_s = \beta \cdot \frac{M}{d} = \frac{E_d}{d} \quad (5.8)$$

, missä  $d$  on paalun halkaisija tai sivumitta

Kertoimelle  $\beta$  voidaan hiekan osalta käyttää arvoja 0,83...0,95, Poissonin vakion vaihdellessa vastaavasti 0,25...0,15.

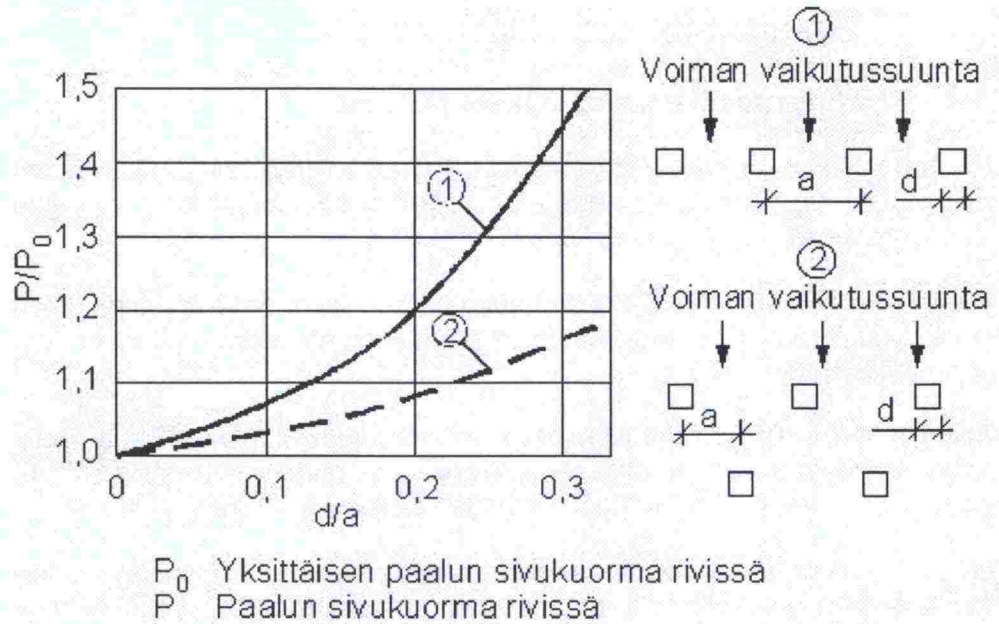
Kokoonpuristuvuusmoduulin  $M$  ja avoimen tilan kimmomoduulin  $E_d$  määrittämisessä pitää huomioida, että parametrit ovat riippuvaisia sekä muodonmuutos- että jännitystasosta. Näin ollen parametrit pitää valita oikealta jännitys- muodonmuutosalueelta. /12/

Vaikka paalulaatan paalut eivät pystysuunnassa toimi ryhmänä, voidaan paalujen käyttäytymistä vaakasuunnassa mallintaa samoilla ohjeilla kuin mitä Lyöntipaalutusohjeessa (LPO-2005) on paaluryhmälle määritelty. Paalulaattarakenteen paalujen tarvittava sivukapasiteetti määräytyy tällöin siten, että paalut lyöntirasitusten jälkeen riittävällä varmuudella eri kuormitustapauksissa kestävät niille tulevat kuormat ja siirtymät pysyvät rakenteen sallimissa rajoissa.

Paalulaatan paaluihin kohdistuvaksi maan sivuvastukseksi valitaan pienempi seuraavista raja-arvoista.

- yksittäisten paalujen sivuvastuksien summa
- paalujen muodostaman ryhmän sivuvastus, olettaen ryhmä yhtenäiseksi perustukseksi

Jos paalut ovat rivissä liikettä vastaan poikkisuunnassa, niin yksittäisen paalun sivuvastus riippuu paalujen keskiöetäisyyksistä maan puristuessa paalujen välistä. Liikettä vastaan ensimmäisessä rivissä olevan yksittäisen paalun sivuvastus voidaan otaksua koheesiomaassa kasvavan paaluvälillä  $a=3...10 \cdot d$  kuvan 5.6 osoittamalla tavalla. Yksittäisten paalujen sivuvastusten summa ei voi ylittää yhtenäiseksi oletetun perustuksen sivuvastusta. /12/



Kuva 5.6. Paalun sivukuorman ja paaluvälin vuorosuhde koheesiomaassa eräiden mallikokeiden mukaan. /12/

Kuvassa 5.6 kertoimella  $P$  tarkoitetaan paalun sivukuormaa rivissä ja kertoimella  $P_0$  yksittäisen paalun sivukuormaa rivissä.

Paaluryhmän pituus liikkeen suunnassa voidaan huomioida sivuvastuksessa, ottamalla mukaan paaluryhmän liikkeen suuntaisten pintojen leikkausvoima. /12/

Paaluryhmän siirtymän ollessa suuri on sivuvastusta laskettaessa alustalukua yleensä redusoitava seuraavasti:

- alustalukua laskettaessa  $d=d$ , kun  $a \geq 8 \cdot d$
- alustalukua laskettaessa  $d=a$ , kun  $a \leq 2,5 \cdot d$

Yllä esitetyissä ehdoissa kerroin  $a$  tarkoittaa paalujen keskiöetäisyyttä liikettä vastaan kohtisuorassa suunnassa ja  $d$  paalun sivumittaa. Väliarvot interpoloidaan lineaarisesti. /12/

Maasta paaluryhmän yksittäisiin paaluihin kohdistuvan sivukuorman laskemiseen soveltuvat alustaluvut on selvitettävä kussakin tapauksessa erikseen, esimerkiksi toispuoleisen täytön tai luiskassa olevien paalujen osalta. /12/



## 5.6 Paalujen rakenteellinen mitoitus

### 5.6.1 Rakenteelliset määräykset ja ohjeet

Teräsbetonipaalu on hoikka rakenne joka kestää ensisijaisesti paalun suuntaista puristusta. Näin ollen paalut ja paaluryhmät on suunniteltava niin, että vältetään paalujen taivutusrasituksia. /12/

Lyöntipaalutusohjeen (LPO-2005) mukaan teräsbetonipaalut mitoitetaan Suomen rakentamismääräyskokoelman teräsbetonirakenteisia pilareita koskevien määräysten mukaan.

Paalun rakenteellisessa mitoituksessa on tarkastettava paalun rakenteellinen murtuminen paalun puristuksesta, lyönnistä ja nurjahtamisesta sekä tarvittaessa vedosta, taivutuksesta ja leikkausrasituksesta. /12/

Teräsbetonipaalujen mitoituksessa käytettävä sallittu halkeamaleveys pitkäaikaiskuormille käyttötilassa on Suomen rakentamismääräyskokoelman (RakMk) betonirakenteita koskevista määräyksistä poiketen 0,2 mm. Noston, kuljetusten ym. rasitusten vaikuttaessa sallittu halkeamaleveys on 0,5 mm. /12/

Betonipeitteen vähimmäisarvo on teräsbetonipaaluilla julkaisun: by50, Betoninormit 2004, mukaisesti ympäristöluokassa XC2 25 mm. Mikäli paalut joutuvat meriveden tai syövyttävän veden vaikutukselle tai toistuvalla jäätymisellä alttiiksi, valitaan mitoittava rasitusluokka standardin SFS-EN 206-1 mukaisesti vallitsevien ympäristöolosuhteiden perusteella. /12/

Lyöntipaalutusohjeessa (LPO-2005) on esitetty teräsbetonisten paaluelementtien minimiteräsmäärät paalun koosta ja pituudesta riippuen. Minimiteräsmäärissä on huomioitu paalun rakenteellinen kestävyys paalun pystyyn noston suhteen. Myös jatketuille paaluille on esitetty tarvittava teräsmäärä paalussa lyönnin aikana vaikuttavan vetojännityksen suhteen.

Teräsputkipaalut voidaan rakenteellisesti mitoittaa joko pelkkinä teräsputkipaaluina tai liittorakenteina raudoitettuina ja betonoituina. Rakenteellinen mitoitus käsittää paalun käytön- ja asennusaikaisen kestävyuden tarkastelut. Käytön aikaisessa tarkastelussa on aina huomioitava paalun korroosiovähennys, mikäli paalua ei ole korroosiosuojattu. Teräsputkipaalun rakenteellisessa mitoituksessa paalun korroosio huomioidaan yleensä paalun poikkileikkauksen ylimitoituksella. Suositukset korroosiovaran suuruudesta on esitetty julkaisussa: Pohjarakennusohje, RIL 121-2004.

Teräsputkipaalujen rakenteellista mitoitusta on yksityiskohtaisemmin käsitelty esimerkiksi julkaisussa: Teräsputkipaalut, sekä RR-paalujen osalta julkaisussa: RR-paalutusohjekirja.

### 5.6.2 Epäkeskisyys

Paalun epäkeskeinen kuormitus aiheutuu paalulaattarakenteessa yleensä paalun käyrydestä. Tämä huomioidaan paalun nurjahdusmitoituksessa. Vain erityistapauksessa, jossa paalu on jäykästi kiinnitetty paalulaattaan, pitää paalun rakenteellisessa mitoituksessa huomioida Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaiset, pilareiden mitoituksessa huomioitavat, paalun perusepäkeskisyys, lisäepäkeskisyys sekä mahdollinen alkuperäinen epäkeskisyys. Alkuperäisellä epäkeskisyydellä tarkoitetaan tällöin paalulaatalta tulevan pystykuormitusresultantin vaakaetäisyyttä paalun yläpään keskipisteestä.

### 5.6.3 Käyryys

Paalun käyryys kuvaa yhden tai useamman paaluelementin kaarevuussädetä. Paalun käyryys puolestaan aiheuttaa tietyllä matkalla tietyn poikkeaman suoran paalun teoreettisesta sijainnista ja tätä poikkeamaa kutsutaan taipumaksi. Nurjahdusmitoituksessa käytettävä paalun alkutaipuma riippuu paalun ja jatkosten sallituista mittapoikkeamista. Nurjahduspituuden, taipuman ja kaarevuussäteen välillä vallitsee kaavan 5.9 mukainen yhteys /12/.

$$R = \frac{L_{cr}^2}{8 \cdot \delta_0} \quad (5.9)$$

Mikäli paalun suoruutta ei mitata voidaan Lyöntipaalutusohjeen (LPO-2005) mukaan teräsbetonipaalun alkutaipuma olettaa taulukon 5.1 mukaiseksi.

*Taulukko 5.1. Paalujen alkutaipuma nurjahdustarkasteluissa [m]. /12/*

	Jatkamaton paalu	Jatkettu paalu
Alkutaipuma $\delta_0$ (m)	$\frac{L_0}{300}$	$\frac{L_0}{150}$

### 5.6.4 Nurjahdus

Paalulaattarakenteessa paalun nurjahduskapasiteetti saavutetaan, kun joko paalun taipumasta aiheutuva sivupaine ylittää ympäröivän maan sivuvastuksen murtoarvon tai kun paalun rasitetuimman poikkileikkauksen rakenteellinen kapasiteetti ylittyy.

Sivutuen suuruutta ja rajoitteita nurjahduksen kannalta Lyöntipaalutusohje (LPO-2005) ohjeistaa seuraavasti: Nurjahdusta vastaan riittämättömästi tueksi paaluiksi katsotaan paalut, jotka ovat osittain tai kokonaan ilmassa, vedessä tai maakerroksessa, jonka suljettu leikkauslujuus on alle 8 kPa. Maan sivutuenta ei voida käyttää hyväksi kun paalun ympärillä olevan eloperäisen maakerroksen leikkauslujuus on pienempi kuin 5 kN/m<sup>2</sup>. /12/ Edellä mainituilla leikkauslujuuden arvoilla tarkoitetaan redusoitua leikkauslujuuden arvoa.



Nurjahduskapasiteetti paalua ympäröivän maan murtumisen suhteen voidaan laskea seuraavasti: Kun maan suljettu leikkauslujuus  $s_u$  on suurempi kuin  $5 \text{ kN/m}^2$  ja maalaji ei ole turvetta eikä liejua (humuspitoisuus  $< 6 \%$ ), käyristyneen paalun nurjahduskuorma  $P_{crb}$  ympäröivän maan kapasiteetin ylittyessä voidaan laskea kaavasta 5.10. /12/

$$P_{crb} = \frac{P_{cr}}{1 + \frac{k_s \cdot \delta_0}{P_{ma}}} \quad (5.10)$$

, missä	$P_{ma}$	on sivuvastuksen murtoarvo
	$\delta_0$	on alkutaipuma nurjahduspituudella
	$P_{cr}$	on suoran paalun nurjahduskuorma
	$k_s$	on maan alustaluku

Paalun alkutaipumana voidaan käyttää taulukossa 5.1 esitettyjä arvoja.

Suoran paalun nurjahduskuorma  $P_{cr}$  lasketaan kaavan 5.11 mukaan.

$$P_{cr} = 2 \cdot \sqrt{k_s \cdot d \cdot EI} \quad (5.11)$$

, missä	$EI$	on paalun taivutusjäykkyys
	$k_s$	on maan alustaluku
	$d$	on paalun sivumitta tai halkaisija

Teräsbetonipaalun taivutusjäykkyys lasketaan kaavan 5.12 mukaisesti.

$$EI = 0,15 \cdot E_b \cdot I_b + E_s \cdot I_s \quad (5.12)$$

, missä	$E_b I_b$	on betonin taivutusjäykkyys
	$E_s I_s$	on terästen taivutusjäykkyys

Kriittinen nurjahduspituus  $L_{cr}$  pehmeimmässä maakerroksessa lasketaan kaavalla 5.13.

$$L_{cr} = \pi \cdot \sqrt[4]{\frac{EI}{k_s \cdot d}} \quad (5.13)$$

Kriittinen nurjahduspituus on kuitenkin aina tarkastettava geoteknisten selvitysten suhteen. Tällöin kriittinen nurjahduspituus on korkeintaan pehmeiden maakerrosten paksuuden pituinen.

Paalun nurjahduskestävyys pysyville kuormille tarkistetaan käyttäen pitkäaikaisen tilanteen alustalukua. Samanaikaisesti vaikuttaville pysyville ja lyhytaikaisille muuttuville kuormille käytetään sivuvastuksen arvoa, joka laskeaan pitkäaikaisen alustaluvun ja lyhytaikaisen alustaluvun avulla kuormien suhteen painotettuna keskiarvona. /12/

### 5.6.5 Taivutus ja sallittu halkeamaleveys

Paalujen mitoituksessa on huomioitava, että paaluun kohdistuu aina taivutusrasituksia. Teräsbetonipaalun sallittu taivutusmomentti voidaan määrittää käyttörajatilassa sallitun halkeamaleveyden avulla. Halkeaman ominaisleveys  $w_k$  rakenteen pinnassa lasketaan kappaleessa 4.3.4 esitetyin periaattein.

Mikäli teräsbetonipaalua kuormittaa normaalivoiman lisäksi ulkoinen taivutusmomentti, vääntömomentti tai leikkausvoima, on paalut tai se osa paalua, johon merkittävin rasitus kohdistuu, mitoittava kaikille rasituksille teräsbetonirakenteita koskevien määräysten mukaisesti. Tällöin on huomioitava, että eri rasitukset saavuttavat maksimiarvonsa usein eri kohdassa paalua.

### 5.6.6 Puristus

Lyöntipaalutusohje (LPO-2005) määrittää teräsbetonipaalun sallitut materiaaliännitykset seuraavasti: Teräsbetonipaalun rakenteellinen kantavuus staattisten kuormitusten suhteen määritetään voimassa olevien SFS-EN – standardien ja Suomen rakentamismääräyskokoelman (RakMK) teräsbetonipilareita koskevien ohjeiden mukaan. /12/

Teräsbetonipaalun lyönnissä sallittu dynaaminen puristusännitys  $\sigma_{dcsall}$  ja vetoännitys  $\sigma_{dtsall}$  lasketaan kaavoilla 5.14 ja 5.15.

$$\sigma_{dcsall} = 0,8 \cdot f_{ck} \quad (5.14)$$

$$\sigma_{dtsall} = \frac{0,9 \cdot A_s \cdot f_y}{A_c} \quad (5.15)$$

, missä  $f_{ck}$  on betonin ominaispuristuslujuus  
 $f_y$  on teräksen myötöraja tai 0,2-raja  
 $A_s$  on raudoituksen poikkipinta-ala  
 $A_c$  on paalun poikkipinta-ala

Pitkiä paaluja lyödessä saattavat iskuaallon aiheuttamat vetoännitykset katkaista paalun. Satojen lyöntien jälkeen paalun betoni on halkeillut eikä ota vetoa. Tällöin terästen on kestävä lyönnin aiheuttamat vetoännitykset niin, että terästen vetoännitys pysyy pienempänä kuin 90 % myötörajasta. /12/

## 5.7 Paaluperustuksen rakenteellinen suunnittelu

### 5.7.1 Yleistä

Paaluperustus suunnitellaan aina yhdessä sen varaan tulevien rakenteiden kanssa, jolloin perustuksen muoto, mitat ja jäykkyys voidaan valita koko rakenteen kannalta edullisimmaksi. /12/

Koska paalulaattaan vaikuttavista kuormista kaikki eivät ole suuruudeltaan tai suunnaltaan täsmällisesti määritettävissä, tulee paaluperustus suunnitella



näiden kuormien suhteen mahdollisimman stabiiliksi eli sellaiseksi, että kuormien vaihtelun aiheuttamat paaluvoimien muutokset jäävät mahdollisimman vähäisiksi.

Paaluperustuksen rakenteellinen suunnittelu käsittää mitoituksen sekä kantavuus-, vakavuus- ja siirtymätarkastelut. Mitoituslaskelmat on aina esitettävä. /12/

Paalutuksen suunnittelussa on otettava huomioon myös paalutustyön epätarkkuudesta johtuvat poikkeamat paalujen sijainnissa ja kaltevuuksissa. Paalulaattarakenne on suunniteltava siten, että se kestää vaaditulla varmuudella paalujen sallittujen sijaintipoikkeamien vaikutukset paalujen kuormiin ja paalulaatan rasituksiin.

Paalulaattarakenteessa paaluille tuleva kuormitus vaihtelee seuraavista syistä:

- erot paalupituuksissa
- erot tukeutumisessa maa- tai kalliopohjaan
- erot paalujen ehjyydessä
- paalujen sijaintipoikkeamat
- paalujen suuntaipoikkeamat

### 5.7.2 Tukipaaluperustuksen alustava suunnittelu

Käytettäessä laatassa pelkkiä pystypaaluja rakenne on epästabiili, jos maan sivuvastusta ei ole tai se on hyvin pieni. Kun maan leikkauslujuus on pieni tai laatan alle syntyy maan painumisesta johtuen tyhjää tilaa, on laskelmin tarkastettava rakenteen stabiliteetti ja samansuuntaisesti mahdollisesti toteutuvien paalujen kaltevuuspoikkeamien vaikutus rakenteen siirtymiin. Rakenteen siirtymiä voidaan tällöin tarvittaessa hallita vinopaalujen avulla. /18/

Rakenteessa, jossa käytetään vinopaaluja, on vinopaalujen määrä ja kaltevuus valittava siten, että vinopaalut vaakasuunnassa vastaanottavat niille tulevan vaakasuoran maanpaineen sekä liikennekuormituksen yhteisvaikutuksen. Toisaalta vinopaalujen määrä ja kaltevuus on valittava siten, että paalujen tukireaktiosta aiheuttavat liikkeet välittyessään paalulaatan toiselle reunalle eivät aiheuta paaluille pengerkuormitusta ja paalun omaa painoa ylittävää vetoa. Paalulaatan tasapainoa voidaan tarkastella lähinnä elementtimenetelmää käyttäen.

Rakenteessa, jossa käytetään vain pystypaaluja, voidaan tarvittavien paalujen määrää vastaavasti arvioida kaavan 5.16 avulla.

$$n > \frac{V_{\max}}{P_{\text{sall}}} \quad (5.16)$$

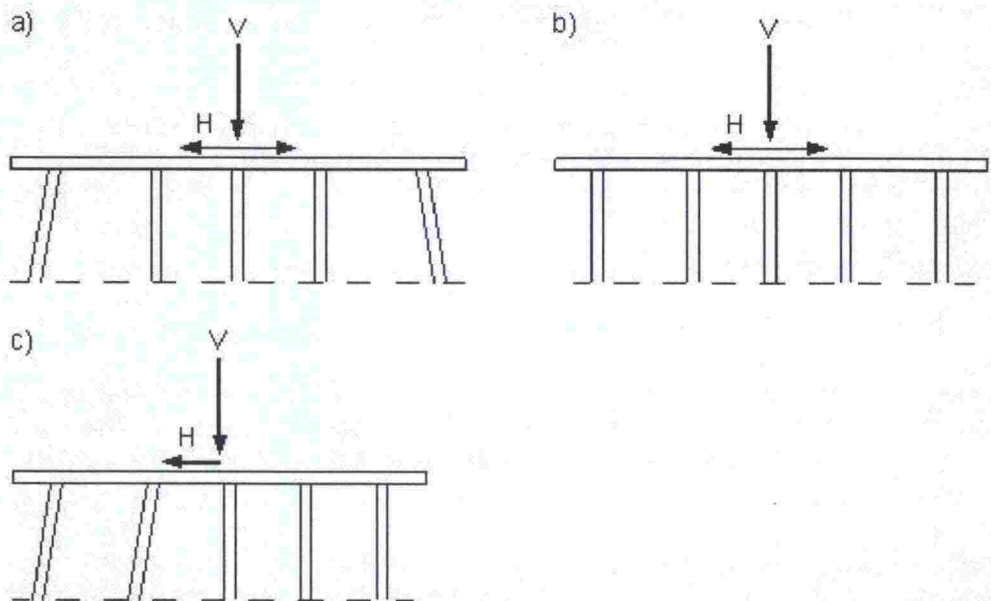
Paalutuksen suunnittelu lähtee yleensä siitä, että lasketaan vaarallisimmat kuormitusyhdistelmät voimassa olevien kuormitusohjeiden mukaisesti. Lyöntipaalutusohjeen (LPO-2005) mukaan kuormina käytetään ominaiskuormia.

Vaarallisimmat kuormitusyhdistelmät paalulaattarakenteessa ovat seuraavat:

- |    |                       |
|----|-----------------------|
| 1. | $V_{\max} + H_{\max}$ |
| 2. | $V_{\max} + H_{\min}$ |
| 3. | $V_{\min} + H_{\max}$ |
| 4. | $V_{\min} + H_{\min}$ |

Kuormakomponentti  $V$  kuvaa paalulaattaan vaikuttavia pystykuormituksia ja kuormakomponentti  $H$  vaakakuormituksia. Paalulaattarakenteessa on vaakakuormia laskettaessa huomioitava myös penkereen pituussuunnassa vaikuttavat vaakasuorat kuormitukset. Paalulaattaan vaikuttavat pysty- ja vaakakuormitukset on esitetty kuvan 5.8 poikkileikkauksissa ja ne on eritelty tarkemmin kappaleessa 3.

Paalulaatalle tulevien kuormitusten määrittämisen, sekä pohjatutkimuksiin perustuvan paalutyyppin ja paalutuskaluston valinnan jälkeen suunnitellaan paaluperustuksen geometria. Suunnittelu pitää tehdä yhdessä paalulaatan suunnittelun kanssa, koska paalujen sijaintien ja kaltevuuksien valinta vaikuttaa merkittävästi paalulaatassa vaikuttaviin jännityksiin. Kuvassa 5.7 on esitetty neljä erilaista paaluperustuksen periaatetta paalulaattarakenteen poikkileikkauksessa. Alustavassa mitoituksessa riittää usein, että tarkastelut suoritetaan paalulaattarakenteen poikkileikkauksessa.



Kuva 5.7. Paaluperustuksen periaateratkaisut paalulaattarakenteessa; a) vinopaalut paalulaatan reunoilla, b) pelkät pystypaalut ja c) epäsymmetrinen poikkileikkaus.

Kuvassa 5.7 esitetyistä periaateratkaisuista kohdan a) vinopaaluratkaisu on Suomessa paalulaattarakenteissa käytetyistä paaluperustuksista geometrialtaan yleisin. Rakenne on yleisimmin toteutettu siten, että yksi tai kaksi reunimmaista paaluriviä ovat vinopaaluja. Vinopaalujen määrä ja kaltevuus määräytyvät yleensä siten, että niiden vaakasuorat komponentit kumoavat vaakasuoran maanpaineen sekä liikenteestä aiheutuvat vaakakuormitukset.

Kuvassa 5.7 b) esitetty pystypaaluratkaisu on myös Suomessa varsin käytetty ja sen käyttöä puoltavat esimerkiksi edellä mainittua vinopaaluratkaisua



pienemmät reunapaalujen taivutusrasitukset paalujen mahdollisesta negatiivisesta vaippahankauksesta tai paalulaattarakenteen leventämiseen liittyvistä sivukuormituksista. Paalulaattarakenne voidaan perustaa pystypaaluin vain, mikäli paalujen riittävästä sivutuennasta voidaan varmistua. Ratahallintokeskus ei kuitenkaan hyväksy paalulaatan perustamista pelkkien pystypaalujen varaan korkealuokkaisilla radoilla.

Kuvassa 5.7 c on esitetty epäsymmetrinen paalutus, jota käytetään vastaan ottamaan kaltevan penkereen tai esimerkiksi kaarteessa keskipakovoiman aiheuttama toispuoleinen vaakakuormitus. Rakenne on erityisen herkkä lähialueiden kaivujen tai läjitysten suhteen.

Paalut on lisäksi sijoitettava siten, että paalutus on mahdollinen tehdä ja paalujen törmäysvaaraa ei ole. Myös kuormakeskittymiä paalujen tavoite-tasossa eli paalujen alapäässä on syytä välttää.

Määräykset koskien paaluperustuksen korkeusasemaa ja paalujen keskiö-etäisyyksiä on esitetty Lyöntipaalutusohjeessa (LPO-2005). Paaluperustuksen korkeusasemaa on lisäksi käsitelty kappaleessa 4.2.2.

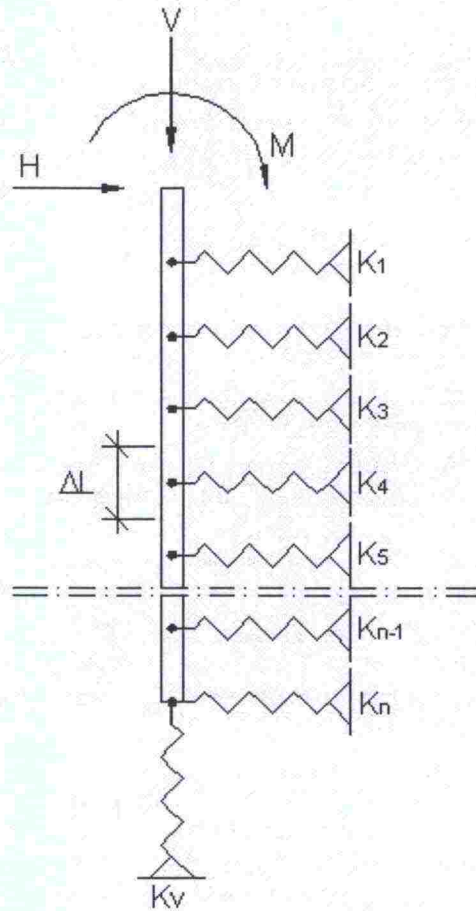
### 5.7.3 Paalun sivukapasiteetin huomioiminen numeerisella menetelmällä

Paalulaattarakenteessa paaluperustukseen vaakakuormituksia voivat aiheuttaa esimerkiksi penkereen vaakasuora maanpaine tai vaakasuorat liikennekuormitukset. Vaakakuormitukset aiheuttavat edelleen kuormien siirtyessä laatalta paaluille paalujen sivusiirtymän, jota puolestaan vastustaa maan paaluun kohdistama sivutuki.

Kun paalulaatan alapuolisten maakerrosten redusoitu leikkauslujuus on yhtä suuri tai suurempi kuin 5 kPa, voidaan Lyöntipaalutusohjeen (LPO-2005) mukaan maan paalua tukeva vaikutus huomioida paalujen mitoituksessa. Soveltuva menetelmä on esimerkiksi elementtimenetelmä (FEM), jossa voidaan kuvata maan epälineaarisuutta epälineaaristen elastoplastisten jousien avulla /15/.

Paalun liikkeistä aiheutuvat reaktiovoimat keskitetään solmupisteisiin jousilla, joiden jousivakioiden arvot vastaavat maan alustalukuja tarkasteltavassa rajatilassa. Laskentatarkkuuden kannalta ovat tällöin tärkeimmät lähinnä maanpintaa olevat jouset. /15/

Numeerisessa analyysissä on paalun pään ja kärjen reunaehdot mallinnettava mahdollisimman hyvin todellisen rakenteen toimintaa vastaaviksi. Myös ylärakenteen jäykkyyden vaikutus paalujen siirtymiin on huomioitava. Kuvassa 5.8 on esitetty elementti-jousimallin periaate.



Kuva 5.8. Paalun ja maan välistä vuorovaikutusta kuvaava elementti-jousimalli. /15/

Vaakasuora jousi  $K_{hi}$  (kuvassa 5.8 jouset  $K_1, K_2, \dots, K_n$ ) lasketaan kaavan 5.17 mukaisesti.

$$K_{hi} = \Delta L \cdot k_{si} \cdot a \quad (5.17)$$

, missä  $\Delta L$  on kuvassa 5.8 esitetty elementti-jousimallin elementti  
 $k_{si}$  on maan vaakasuora alustaluku  
 $a$  on paalunsivuvastusta laskettaessa käytetty mitta

Paalun vaakasuuntainen jousivakio  $k_{si}$  lasketaan kappaleessa 5.5.3 esitettyjen periaatteiden mukaisesti.

Paalun alapään pystysuora jousi  $K_v$  lasketaan kappaleessa 5.4.5 esitettyin periaattein. Paalun vaipan kantokykyä ei jousimallissa paalulaattarakenteiden osalta yleensä huomioida. Vaipan kantokyky paalulaatalle tyypillisillä käyttöalueilla jää koko paalun kantokyvyn kannalta merkityksettömäksi. Toimenpide myös yksinkertaistaa mallinnusta.

Paalun vaipalla toimivia jousia  $K_{vi}$  laskettaessa on kuitenkin huomioitava paalulaattarakenteessa mahdollisesti vaikuttava paalujen negatiivinen vaippahankaus. Koska negatiivinen vaippahankaus kuormittaa paalua, pitää



myös se mallintaa pystysuoran kuorman V suuntaisesti jokaiseen negatiivisen vaippahankauksen vaikutusalueella olevaan solmupisteeseen. Samoin täytyy toimia paalun mahdollisen sivukuormituksen suhteen.

## **5.8 Paalutustyö**

### **5.8.1 Yleistä**

Teräsbetonisten lyöntipaalujen lyönnissä pitää noudattaa Lyöntipaalutusohjeen (LPO-2005) antamia ohjeita ja määräyksiä. Ohjeet ja määräykset, jotka kattavat sekä normaalit että vaikeat olosuhteet, tuottavat oikein noudatettuihin yhdessä pohjasuhteisiin nähden oikein valitun paalutyypin kanssa ehjän ja toimivan paalutuksen. Tällöin paalulaattarakenteen paalutuksen suunnittelussa pitää huomioida sekä yksittäisen paalun lyöntiä koskevat määräykset, että paalun lyönnin vaikutukset jo aiemmin lyötyihin paaluihin.

Paalutustyössä on lisäksi paalutustyön johtamisen ja valvonnan osalta noudatettava Lyöntipaalutusohjeessa (LPO-2005) annettuja määräyksiä ja ohjeita. Lisäksi käytettävän paalutuskaluston sekä paalujen käsittelyn työmaalla on teräsbetonipaalujen osalta täytettävä Lyöntipaalutusohjeen (LPO-2005) asettamat vaatimukset.

Paalutuksen toimivuuden varmistamiseksi on paalutuskohteen laadunvalvontaan, dokumentointiin, erilaisiin seuranta- ja ehjyysmittauksiin sekä koe-kuormitukseen kiinnitettävä erityistä huomiota. Lyöntipaalutusohjeessa (LPO-2005) on esitetty yleispiirteiset ohjeet näiden tehtävien suorittamiseksi.

Paalutustyössä on aina kiinnitettävä erityistä huomiota työturvallisuuteen ja ympäristösuojaan.

Teräspalkkipaalujen osalta edellä mainittuja toimenpiteitä on käsitelty julkaisuissa: Teräspalkkipaalut ja RR-paalutusohjekirja. Näissä julkaisuissa on annettu myös ohjeita paalutuskaluston valinnasta, paalujen lyönnistä, paalutuksen aiheuttamista vaikutuksista ympäristöön ja jo asennettuihin paaluihin sekä paalujen loppulyöntiehdosta.

### **5.8.2 Paalutuksen vaikutus jo lyötyihin paaluihin ja ympäristöön**

#### **Maan syrjäytyminen**

Savi- ja silttimaalajeissa paalu syrjäyttää oman tilavuutensa verran maata. Kitkamaassa syrjäytymistä tapahtuu lähinnä keskitiiviissä ja tiiviissä maassa. Mikäli otaksutaan, että siirtymät ovat haitallista suuruusluokkaa, niitä on seurattava työn aikana mittauksilla ja tarvittaessa ryhdyttävä toimenpiteisiin. /12/

Maan syrjäytyminen painottuu yleensä vakavuudeltaan heikompaan suuntaan /12/. Paalutuksen osalta tämä on huomioitava erityisesti sivukaltevassa maastossa tai kun alueella on sivulle päin viettäviä lujuudeltaan heikompia maakerroksia.

Maa siirtyy samanaikaisesti pysty- ja vaakasuunnassa. Vaakasiirtymät ovat yleensä suurimmillaan paalutettaessa luiskien ja jo lyötyjen paalujen läheisyydessä. Savi, siltti sekä eloperäisissä kerroksissa pystysuuntainen siirtymä eli maan nouseminen pitää ottaa suunnittelussa huomioon. Osa paalutuksen aiheuttamista siirtymistä palautuu kuitenkin ajan mukana konsolidoitumisesta johtuen. /12/

Siirtymiä, joiden vaikutusalueen voidaan arvioida ulottuvan paalun kärjestä kaltevuudessa 1:1 maanpintaan, voidaan ehkäistä seuraavin toimenpitein:

- paalutusjärjestyksellä
- tekemällä reikä paalun kohdalle karkearakeisissa maakerroksissa ja moreenikerroksissa sekä poistamalla maata paalun kohdalta hienorakeisissa ja eloperäisissä maakerroksissa
- käyttämällä IA-luokan betonipaaluja tai pieniläpimittaisia teräspaaluja, joiden kantavuus on korkea suhteessa paalun poikkileikkauksalaan

Sivusiirtymien pienentämiseksi oikea paalutusjärjestys on paalulaattarakenteessa sivukaltevan maaston osalta vakavuudeltaan heikompaan suuntaan. Tasaisessa maastossa paalutusjärjestys kannattaa puolestaan valita siten, että paalutus etenee paalulaatan poikkileikkauksessa keskeltä reunoja kohti.

### Maan häiriintyminen ja huokospaineen nousu

Hienorakeisissa ja eloperäisissä maakerroksissa paalun lyönti aiheuttaa maan häiriintymistä ja huokospaineen nousua. Sekä maan häiriintyminen että huokospaineen nousu pienentävät maan lujuutta. Tästä saattaa seurata lähirakenteiden siirtymiä tai sortumia. /12/ Paalulaattarakenteen kannalta riskialttiita ovat myös erityisesti paalukentän läheisyydessä tapahtuvat läjitys ja kaivutyöt.

Huokosveden ylipainetta ja häiriintymistä voidaan Lyöntipaalutusohjeen (LPO-2005) mukaan ehkäistä seuraavin toimenpitein:

- Poistamalla savea lyötävän paalun kohdalta esimerkiksi putkiottimella tai auger-kairalla
- Varustamalla lyötävä paalu pystyjoilla
- Käyttämällä IA-luokan betonipaaluja tai pieniläpimittaisia teräspaaluja
- Työjärjestyksellä, jossa ensin lyödään osa esimerkiksi joka toinen paalu ja myöhemmin huokosvedenpaineen alennettua loput paaluista
- Odottamalla ja mittaamalla huokosvedenpaineen alenemista

### Tärinä

Erityisen voimakasta maanpinnan heilahtelua saattaa aiheutua paalutuskoneen liikkeistä pehmeää savikerrosta peittävän kuivakuoren tai routakerroksen päällä sekä myös lyötäessä paalua em. pintakerroksen läpi tekemättä reikää paalun kohdalle. /12/

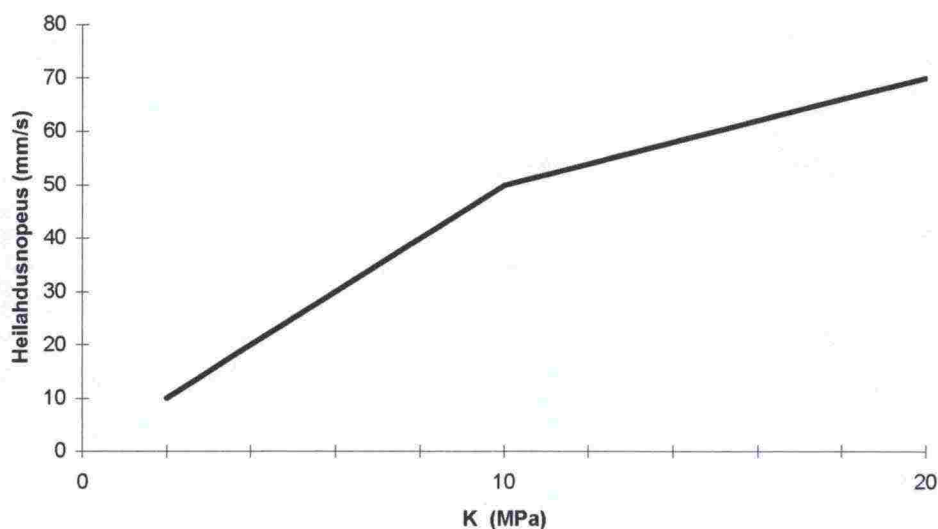
Paalutettavan kohteen ympäristön rakenteet ja laitteet täytyy selvittää siten, että tarkoituksen mukaiset katselmukset ja seurantamittaukset voidaan



suunnitella. Tärinän mittaamista sekä arviointia on ohjeistettu Lyöntipaalutusohjeessa (LPO-2005). VTT julkaisussa: Suositus liikennetärinän mittamisesta ja luokituksesta, on esitetty suosituksia eri kuntoisten rakennusten tärinärajoiksi /17/.

Rakennettaessa suuria tie- tai ratahankkeita, jotka muodostuvat useista peräkkäisistä paalulaattarakenteista, on hankkeen työvaiheita usein limitettävä tiukan aikataulun vuoksi. Tällöin on huomioitava paalutustyön aiheuttaman tärinän vaikutus viereisen paalulaatan tai muun betonirakenteen valun onnistumiselle.

Sitoutumisvaiheessa olevan betonin tärinälle ehdotetaan kuvan 5.9 mukaisia, betonin lujuuteen perustuvia raja-arvoja. Sitoutumislämpötilasta riippuva betonin lujuuden kehitys vaihtelee betonin laadun ja paikallisten olosuhteiden mukaan.



Kuva 5.9. Sitoutumisvaiheessa olevan betonin tärinän raja-arvot lujuuden perusteella.

Paalutustyöstä aiheutuvaa tärinää voidaan Lyöntipaalutusohjeen (LPO-2005) mukaan pienentää seuraavilla toimenpiteillä:

- keskeisellä iskulla
- optimoidulla lyöntienergialla (PDA-mittaus)
- iskukaluston valinnalla ja säädettävyydellä
- läpäisemällä tiiviit kerrokset: routa, kuivakuori, täytöt, rantakerrostumat kaivamalla tai esireiällä
- käyttämällä pieniläpimittaisia teräsputkipaaluja
- Ongelmallisissa tapauksissa voidaan käyttää kitkan pienentämiseen bentoniitti – sementtilaastia

## Melu

Paalulaattarakenteen paalutustyöstä aiheutuvaan meluun on erityisesti kiinnitettävä huomiota paalutettaessa taajama-alueilla tai muiden pysyvään asumiseen tai oleskeluun tarkoitettujen alueiden läheisyydessä.

Lyöntipaalutuksen aiheuttamaa melua paalutuskohteen ympäristössä voidaan arvioida Lyöntipaalutusohjeessa (LPO-2005) annetuin ohjein. Tehokkain keino paalutustyön aiheuttaman melun rajoittamiseksi on käyttää melueristettyä paalutuskalustoa.

### 5.8.3 Vaikeat pohjasuhteet

Mikäli paalutettavalla alueella on vaikeasti läpäistäviä täytekerroksia tai rou-taa, jonka läpi löytäessä paalun voidaan olettaa rikkoutuvan, on paalulle tehtävä poikkileikkaukseltaan ko. paalun kokoinen reikä esimerkiksi sopivasti muotoiltua teräspaalua käyttäen. Tällöin on kuitenkin varottava, ettei reiän tekeminen vaurioita paalulaatan aiemmin lyötyjä paaluja. Toisaalta olosuh-teista riippuen voidaan esimerkiksi ohuen vaikeasti läpäistävän kerroksen massat vaihtaa tai pelkästään poistaa.

Myös erittäin pehmeät pintakerrokset vaikeuttavat paalutustyötä. Yleisin me-netelmä paalutusalustan vahvistamiseksi on riittävän paksun työalustan ra-kentaminen. Tällöin on kuitenkin huomioitava, että työalustan paksuuden kasvaessa, kasvaa myös paaluja lopullisessa rakenteessa kuormittava ne-gatiivinen vaippahankaus sekä paalulaatan valualustan betonin sitoutumisen aikainen painuma.

Paalutusalustan kantokykyä voidaan heikosti kantavilla maapohjilla parantaa myös seuraavin toimenpitein:

- lyömällä paalut kuivakuorikerroksen päältä
- lyömällä paalut jääntyneen pintakerroksen päältä esireikää apuna käyttäen
- stabiloinnilla
- jakamalla paalutuskoneen aiheuttamaa alustan kuormitusta telalavoilla tai muulla vastaavalla tavalla

Edellä mainittuja menetelmiä käyttäen välttää aiheuttamasta paaluille lisäkuormituksia lopullisessa rakenteessa.

Kun paalun kärki ulottuu vinoon kallionpintaan tai kun kallion tukeutuvan paalun kohdalla paalua vaakasuunnassa tukevat karkearakeiset tai moreeni maakerrokset ovat ohuita saattaa paalu rikkoutua lyötäessä. Tällöin on paalun loppulyönnit suoritettava varoen, Lyöntipaalutusohjeessa (LPO-2005) annettuja ohjeita ja määräyksiä noudattaen. Erityisesti vinoihin paaluihin kohdistuu lisäksi liukumisvaara riittävän sivutuennan puuttuessa. Paalu voi rikkoutua myös paalun tavoitetason ollessa lohkarainen tai kivinen.

Teräsbetonipaalun varustaminen kallionkärjellä parantaa merkittävästi varmuutta paalun alapään liukumisen suhteen sekä pienentää selvästi paalun alapään vaurioitumisriskiä.



#### 5.8.4 Lyhyet paalut

Lyhyitä paaluja lyödessä on huolellisesti noudatettava kaikkia paalun lyönistä yleensä annettuja ohjeita. Erityistä ja jatkuvaa huomiota on kiinnitettävä paalujen paikallaan pysymiseen sekä paalun kärjen ja kiinteän pohjan välisen kosketuksen varmistamiseen. /12/

Lyöntipaalutusohjeen (LPO-2005) mukaan alle 3 metriä pitkät paalut on kiinnitettävä jäykästi paalulaattaan. Tämä toteutetaan piikkaamalla paalun rauditus esiin riittävän ankkurointipituuden varmistamiseksi ja liittämälle ne edelleen laatan valuun. Alle 1,5 metrisiä paaluja ei paalulaattarakenteessa saa käyttää.

Lyhyiden paalujen osalta on erityisesti tarkkailtava, että paalut eivät liiku paalutustyön aikana.

#### 5.8.5 Lyönnin lopettaminen

Lyöntipaalutusohjeessa (LPO-2005) on esitetty toimenpiteet teräsbetonisten lyöntipaalujen loppulyöntien tekemiseksi sekä loppulyöntiohjeet /12/. Ohjeet RR-paaluille on esitetty RR-paalutusohjekirjassa /9/. Loppulyöntiohjeiden varmistamiseksi täytyy aina paalutusluokassa IB sekä mahdollisuuksien mukaan myös paalutusluokassa II tehdä dynaamiset koekuormitukset.

Koekuormitusten osalta on syytä muistaa, että riittävä aika paalutuksen ja koekuormituksen välillä laskee oleellisesti maassa paalutuksen jälkeen vaikuttavaa huokosylipainetta ja kasvattaa näin koekuormituksilla saavutettua vastusta.

### 5.9 Sallitut sijaintipoikkeamat

Lyöntipaalutusohjeen (LPO-2005) mukaan perustuksen paikan ja paalukoordinaattien mittauksessa on suurin sallittu mittavirhe 20 mm, elleivät suunnitelmat toisin edellytä. /12/

Koska paalulaatta ei ole täysin jäykkä, toimivat sen paalut pystysuunnassa yksittäisinä paaluina. Tällöin yksittäinen paalu saa poiketa teoreettisesta sijaintipaikastaan enintään 100 mm. /12/

Paalukaltevuuksien suurimman sallitun poikkeaman ohjearvona voidaan käyttää yksittäisessä paalussa  $\pm 0,04$  (40 mm/m). Lisäksi kaltevien paalujen horisontaalisuunta (projektio vaakatasossa) saa poiketa korkeintaan  $10^\circ$  suunnitelmassa esitetystä suunnasta. /12/

Paalutustyön jälkeen suoritettujen paalujen asemien mittauksen perusteella on määritettävä todellisten poikkeamien arvot ja tarkastettava, että ne pysyvät suunnitelman sallimissa rajoissa. /12/

Paalujen sijaintipoikkeamat vaikuttavat paalulaattarakenteessa paalulaatan rakenteelliseen mitoitukseen. Tämän vuoksi paalulaatan rakenteellinen kestävyys on aina tarkastettava sallittujen sijaintipoikkeamien ylittävien paalujen

paalulaatalle aiheuttamien rasitusten suhteen. Mikäli paalulaatan rakenteellista kestävyyttä ei laatan raudoitusta lisäämällä voida saavuttaa tai se ei ole taloudellisesti perusteltua, on paalulaattarakenteeseen suunniteltava paalulaatan rakenteellisen mitoituksen määräykset täyttävä lisäpaalutus.



## 6. ESIMERKKITAPAUKSET

### 6.1 Tarkastelujen suorittaminen

Esimerkkitapauksina toimivia paalulaattarakenteita on tarkasteltu sekä niiden geoteknisen että rakenteellisen toimivuuden suhteen. Geotekniset tarkastelut kohdistuvat penkereen vakavuuteen, paalulaatan valualustan painumaan, paalujen mahdolliseen negatiiviseen vaippahankaukseen sekä paaluperustuksen toimivuuteen. Rakenteellisesti paalulaattoja tutkitaan paalun sekä sienilaatoissa sienien reunaosien läpileikkautumisen suhteen. Tarkasteluja on myös tehty laatan halkeilun suhteen.

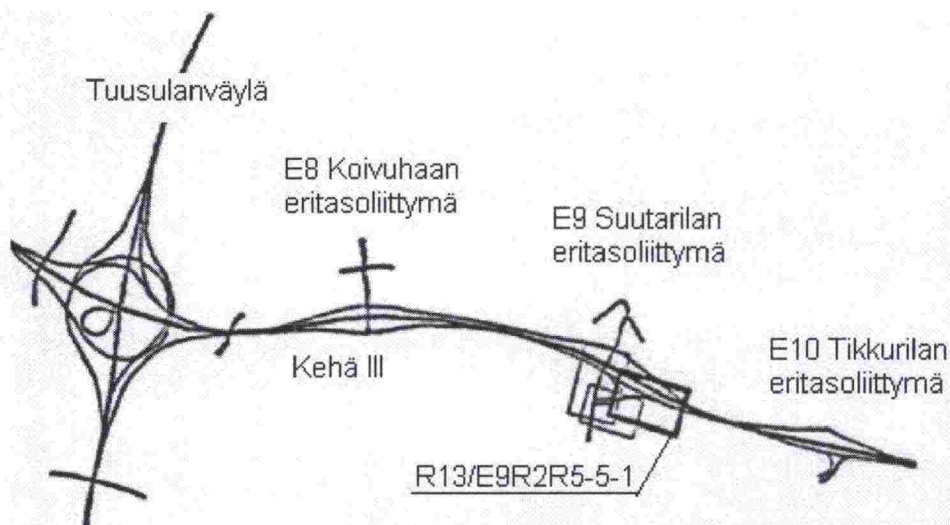
Lisäksi on tutkittu vastaavako esimerkkitapausten suunnitelmat voimassa olleita suunnitteluohjeita.

Esimerkkitapauksissa 1 – 4 käsiteltyjen paalulaattojen kannattamien penkereiden käytössä ei ole havaittu ongelmia. Vaikka näiden esimerkkitapausten paalulaattojen leveydet eivät ole riittäviä kappaleessa 4.2.1 esitetyn paalulaatan yläpuolisen pengerosan vakavuuden  $F=1,5$  saavuttamiseksi, voidaan niiden olettaa vaikuttavan ainoastaan tien kunnossapitoon, eteenkin mikäli pohjamaan ominaisuudet voidaan katsoa riittäviksi paalulaatan ulkopuolisen pengerosan kuormituksen suhteen.

### 6.2 Kehä III (Kt 50) parantaminen välillä Lentoasemantie – Tikkurila, Suutarilan eritasoliittymä

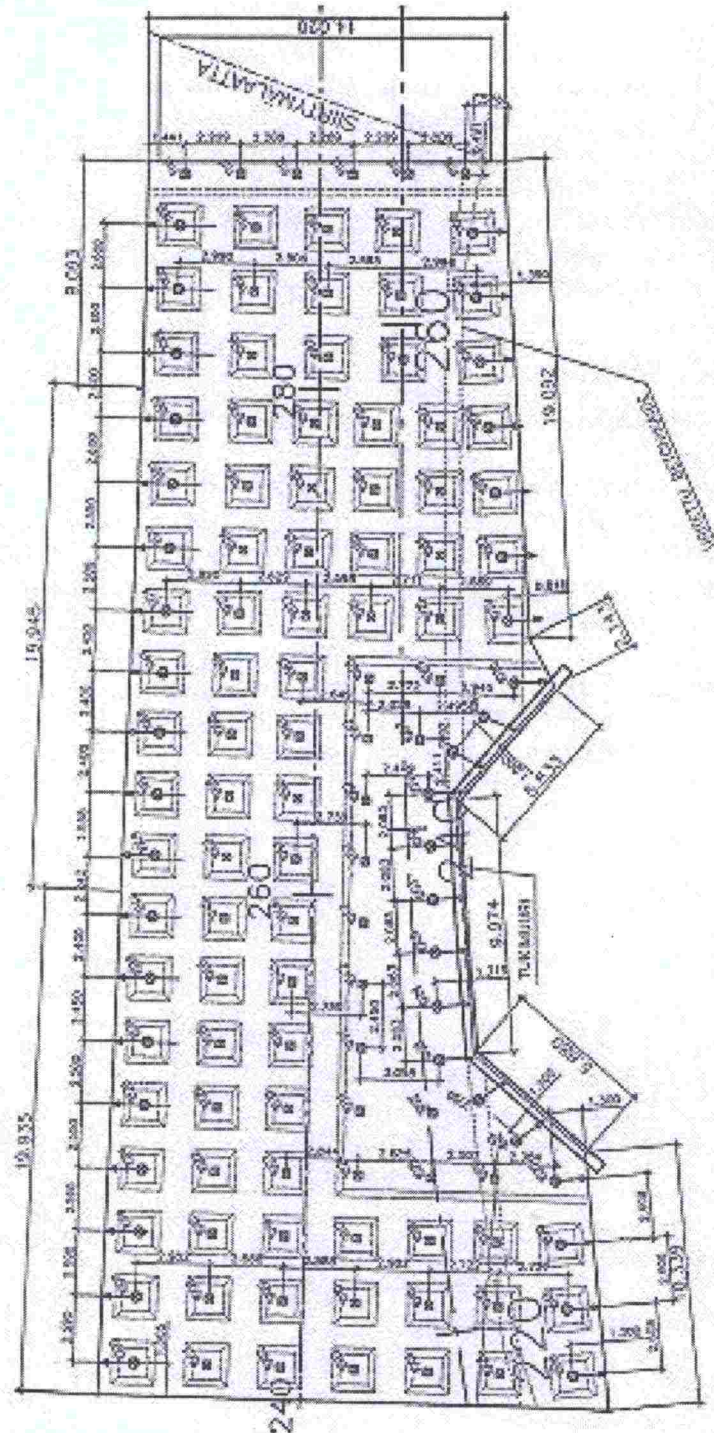
#### 6.2.1 Kohteen kuvaus

Esimerkkitapauksena 1 käytetään Suutarilan eritasoliittymän, ramppien 2 ja 5 liittymäkohdassa olevaa paalulaattaa numero 6, joka laattatyypiltään on pääosin sienilaatta. Paalulaatan suunnitelmat on tehty vuosien 2002 ja 2003 aikana. Paalulaatta on rakennettu loppuvuodesta 2003. Kohteen sijainti selviää kuvasta 6.1.



Kuva 6.1. Kohteen sijainti.

Paalulaatta sijoittuu paaluvälille 240 – 289. Se liittyy lännessä paalulaattaan numero 3 ja idässä siirtymälaatan avulla syvästabilointiin. Siirtymälaatan pituus on 5 metriä. Siirtymälaatan kiinnitys paalulaattaan on tehty kappaleen 2.1 mukaista tappiliitosta käyttäen. Paalulaatan eteläreunalla on laattaan liittyvä tukimuuri. Laatan muoto ja liittyminen ympäröiviin rakenteisiin selviää kuvasta 6.2. Liitteen 2 kuvassa 1 on esitetty paalulaattarakenteen poikkileikkaus paalulla 260.



Kuva 6.2. Paalulaatan tasokuva.



Paalulaatta on rakennettu maanpinnan tasoon. Paalulaatan yläpinnan korkeusasema vaihtelee välillä +14,65...+15,345. Leikkauspohja sijaitsee noin 0,75 metriä paalulaatan yläpintaa alempana, jolloin alustäytön paksuus on enimmillään noin 0,55 metriä. Pengerkorkeus vaihtelee välillä 2,2...2,8 metriä.

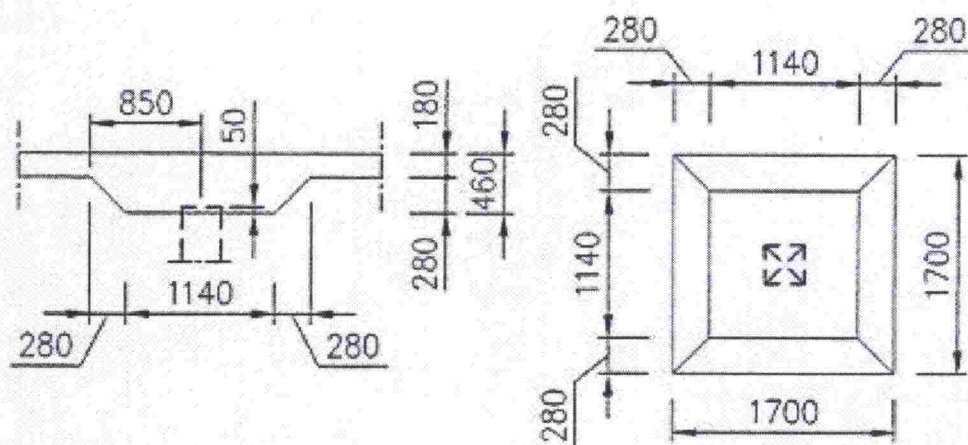
Paalulaatan kohdalta on tehty 5 painokairausta. Lisäksi käytettävissä on ollut viereisten rakenteiden kohdalta saatuja paino- ja siipikairaustuloksia.

Pohjasuhteiltaan kohde on vaikeahko. Maanpinnassa on ohut, paksuudeltaan 0,5...1 metriin vaihteleva saven kuivakuorikerros, josta on kuitenkin osa paalulaatan alustäyttöä rakennettaessa leikattu pois. Kuivakuorikerroksen alla on 3,5...5,5 metriä pääosin pehmeää, lujuudeltaan 10...20 kPa vaihtelevaa savea. Tämän alla on 4...5 metriä sitkeää, lujuudeltaan 20...30 kPa vaihtelevaa savea. Saven alla 1...1,5 metriä tiiveydeltään löyhästä keskitiiviiseen vaihtelevaa silttiä. Siltin alla on 0...1 metriä pääosin tiivistä soraa tai moreenia. Kairaukset on päätetty tasolla +3,5...+5,0 tiiviiseen kerrostumaan tai kiveen.

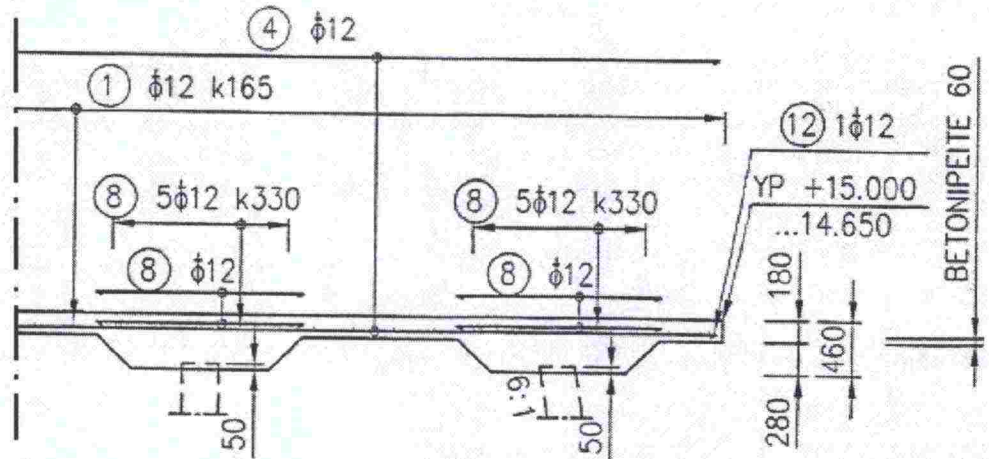
## 6.2.2 Rakenne

Paalulaattarakenne on perustettu teräsbetonisilla 300\*300 mm<sup>2</sup> tukipaaluilla. Paalut on mitoitettu Lyöntipaalutusohjeen (LPO-87) mukaan paalutusluokassa II ( $P_{sall} = 630$  kN). Paalut on katkaistu siten, että ne tulevat 50 mm rakenteen sisään. Vinopaalujen kaltevuuksina on käytetty 6:1 ja 10:1. Kaikki paalut olivat laatikkokärjellisiä.

Paalulaatan sienilaattaosa on yhteen tasoon raudoitettu. Lisäksi suurin osa sienistä on vahvistettu leikkausraudoituksella. Sienen mitat on esitetty kuvassa 6.3 ja laatan rauditus kuvassa 6.4.



Kuva 6.3. Sienen mitat.



Kuva 6.4. Laatan raudoitus.

Kuvasta 6.2 erottuva tukimuuria ympäröivä tasapaksu laattaosa on raudoitettu kahteen tasoon.

Laatta on mitoitettu rakenneluokassa 1 ja betonina on käytetty K40-1. Betoniteräksinä on käytetty A500HW. Raudoitteiden betonipeitteinä on sienilaatan osalla käytetty 60 mm laatan alapinnasta ja tukimuurin tasapaksulla laattaosalla 35 mm. Sienilaattaosan välikaistojen kohdalle on asennettu suodatinkangas kl 3 maata vasten.

Rakenne on mitoitettu liikennekuormalle (Lk1) ja erikoiskuormalle (Ek1). Työkoneiden liikkumisesta laatalta on annettu erityisohjeet.

Laatan kaltevuuden ollessa vähemmän kuin 1:50, rakenteen kuivatus toimii välikaistojen risteyksiin tehdyillä, halkaisijaltaan 100 mm rei'illä.

### 6.2.3 Rakenteen toimivuuden arviointi

#### Geotekninen toimivuuden arviointi

Paalulaatan ulkopuolelle jäävän penkereen osan varmuus voidaan katsoa riittäväksi. Noin  $20 \text{ kN/m}^2$  pengerkuormitus on pohjamaan ominaisuuksiin nähden sallittava.

Paalulaatan 0,55 metrin alustäyttö aiheuttaa paaluille noin 80 kN negatiivisen vaippahankauksen, kun painuvan kerroksen paksuudeksi oletetaan 5,5 metriä. Liikennekuormituksen ollessa  $27 \text{ kN/m}^2$  (pengerkorkeus 2,7 m) ja paaluvälin 2,083...2,902 ei negatiivista vaippahankausta paalukuormia määritettäessä kuitenkaan tarvitse huomioida.

Koska saven ohut kuivakuorikerros oli osittain paalulaatan alustäyttöä rakennettaessa leikattu pois, voidaan valualustan odottaa painuvan jonkin verran betonin sitoutumisen aikana. Painuman suuruutta ja etenkin nopeutta on kuitenkin vaikeaa arvioida ilman ödometrikokeita.



### Rakenteellinen toimivuuden arviointi

Paalulaatan rakenteellinen toiminta tutkitaan läpileikkautumisen suhteen. Läpileikkautuminen tarkastetaan paalulaatan keskeisesti raudoitetulta osalta. Tarkastelussa on huomioitu paalujen sijaintipoikkeamista aiheutuva paaluvälin kasvu. Taulukoissa 6.1 on esitetty läpileikkautumistarkastelun tulokset.

*Taulukko 6.1. Paalun ja sieniosan reunojen läpileikkautuminen keskeisesti raudoitetulla osalla.*

Tarkasteltava kohta	Paalukuorma (kN/m <sup>2</sup> )	Laskentakuorma murtorajatilassa, V <sub>d</sub> (kN)	Lävistyskapasiteetti, V <sub>c</sub> (kN)
Paalu 1009	880	<b>640</b>	<b>658</b>
Sieniosan reunat	880	<b>381</b>	<b>1132</b>

Taulukosta 6.1 havaitaan, että laatan lävistyskapasiteetti on riittävä paalujen sijaintipoikkeamat huomioiden. Sienten leikkausraudoitus on suunniteltu toteutuneen paalutuksen mukaan, jolloin se vaihtelee jonkin verran laatan eri osissa. Yksittäisen paalun suurin sijaintipoikkeama suunnitellusta oli 136 mm.

## 6.3 E18 Paimio – Muurla

### 6.3.1 Kohteen kuvaus

Esimerkkitapaus 2 on Muurlan eritasoliittymän, Ruotsalan joen ylittävään siltaan (S941) liittyvän paalulaatta ryhmän paalulaatta numero 5. Laattatyypinä on käytetty sienilaattaa. Kohde on paalutettu vuonna 2001. Tämän jälkeen pengerkorkeutta on päätetty madaltaa noin 1 metrillä. Lisäksi kohteen urakoitsija on työteknisistä syistä halunnut muuttaa käytettävää hattumuotoa. Paalulaatan uudet suunnitelmat on tehty keväällä 2002. Liitteen 2 kuvassa 2 on esitetty laatan numero 5 tasokuva.

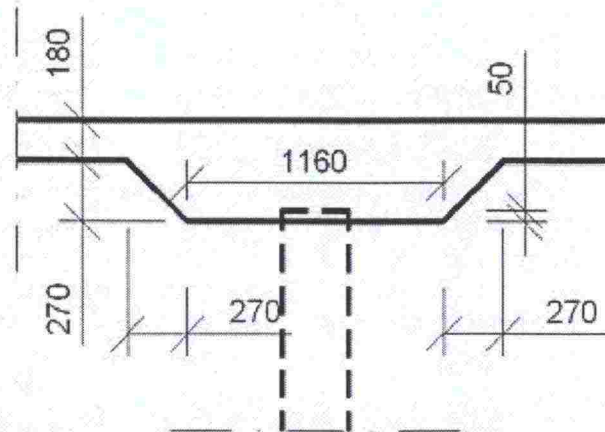
Paalulaatta sijaitsee paaluvälillä 63704 – 63738,5. Se liittyy luoteessa paalulaattaan numero 3 ja kaakossa paalulaattaan numero 7. Koillisessa paalulaatta liittyy vasemman puoleisen ajoradan paalulaattaan numero 4.

Suunnitelmien mukaan pengerkorkeus vaihtelee välillä 1,43...2,06 metriä. Penkereen luiskan kaltevuus on laatan lounaispuolella 1:1,3.

### 6.3.2 Rakenne

Paalulaattarakenne on perustettu teräsbetonisilla 300\*300 mm<sup>2</sup> tukipaaluilla. Paalut on mitoitettu lyöntipaalutusohjeen (LPO-87) mukaan paalutusluokassa II (P<sub>sall</sub> = 630 kN). Paalut on katkaistu siten, että ne tulevat 50 mm rakenteen sisään. Vinopaalujen kaltevuuksina on käytetty 8:1.

Laatta on mitoitettu rakenneluokassa 1, käyttäen betonina K40-1 ja betoniteräksinä A500HW. Sienen mitat on esitetty kuvassa 6.5.



Kuva 6.5. Sienen mitat.

Paaluväli vaihtelee laatan poikkisuunnassa välillä 2300...2790 mm ja pituussuunnassa välillä 2500...2750 mm.

Paalulaatta on raudoitettu yhteen tasoon. Raudoitus laatan poikkisuunnassa on  $\phi 16k220$ . Raudoitus laatan pituussuunnassa on laatan keskiosilla  $\phi 16k220$  ja reunoilla  $\phi 16k250$ . Laatan keskialueen sienet on leikkausraudoitettu verkolla  $\phi 16k400$ . Lisäksi laatan reunoille on sen kaakkois- ja luoteispäihin asennettu raudoitus  $\phi 16k800$  kahden ensimmäisen paalurivin välille.

Raudoituksen betonipeitteenä rakenteessa on käytetty 50 mm ohuemman laattaosan alapinnasta. Raudoituksen sallittuna sijaintipikkeamana on pidetty  $\pm 10$  mm. Tällöin betonipeitteen nimellismitta on 40 mm laatan alapinnasta.

Rakenne on mitoitettu liikennekuormalle (Lk1) ja erikoiskuormalle (Ek1). Työkoneiden liikkumisesta laatalta on annettu erityisohjeet.

Laatan alle, välikaistojen kohdalle on asennettu suodatinkangas kl 2 maata vasten. Laatan kuivatus on rakennettu halkaisijaltaan 50 mm vedenpoistorei'illä k/k 6,0 m.

### 6.3.3 Rakenteen toimivuuden arviointi

#### Rakenteellinen toimivuuden arviointi

Paalulaatta on mitoitettu siltarakenteena. Mitoitusperusteina suunnitelmissa on mainittu mm. Tielaitoksen julkaisut: Siltojen kuormat, Pengerlaatat ja Pengerpaalutus. Näistä julkaisu: Pengerpaalutus, oli vanhentunut ja se oli korvattu vuonna 2001 julkaistulla Paalulaattojen ja paaluhattarakenteiden suunnitteluohjeella.

Paalulaatan mitoituksessa oli määrääväksi muodostuneella erikoiskuormalla (Ek1) liikennekuormituksena käytetty vanhentuneiden, alkuperäisen suunnittelutapahtuman aikana voimassa olleiden ohjeiden mukaisesti  $31,7 \text{ kN/m}^2$  sysäyslisän kanssa, pengerkorkeuden ollessa 2,05 metriä. Tämä ei kuitenkaan vastaa Siltojen kuormat mukaista kuormitusta, jonka voidaan penke-



reessä olettaa jakautuvan 2:1. Siltojen kuormat mukainen liikennekuormitus sysäyslisä huomioituna on 2,05 metrin pengerkorkeudella 44 kN/m<sup>2</sup>. Tällöin kokonaiskuormitukseksi murtorajatilassa saadaan 120 kN/m<sup>2</sup>, paalulaatan painon ollessa 8 kN/m<sup>2</sup>.

Paikoin penger oli kuitenkin edellä mainittua matalampi. Pengerkorkeudella 1,43 m liikennekuormitus on 67,5 kN/m<sup>2</sup> sysäyslisän kanssa ja kokonaiskuormitus murtorajatilassa 138 kN/m<sup>2</sup>. Suunnitelmissa käytetty kokonaiskuormitus murtorajatilassa oli 103 kN/m<sup>2</sup>. Tällöin mitoituskuorma murtorajatilassa oli 35 kN/m<sup>2</sup> voimassa olleiden ohjeiden mukaista kuormitusta pienempi.

Läpileikkautuminen oli suunnitelmissa tarkastettu paalun kohdalta, huomioimatta raudoituksen tai laatan vahvuuden toleransseja. Suunnitelmien mukainen läpileikkautumistarkastelu on esitetty taulukossa 6.2.

*Taulukko 6.2. Suunnitelmien mukainen läpileikkautumistarkastelu.*

$p_d$ (kN/m <sup>2</sup> )	Kuorman kerääntymisalue (m <sup>2</sup> )	Lävistyskartion alue (m <sup>2</sup> )	d (m)	Laskenta-kuorma murtorajatilassa, $V_d$ (kN)	Lävistyskapasiteetti $V_c$ (kN)
103,18	7,673	0,824	0,304	<b>707</b>	<b>747</b>

Kun huomioidaan raudoituksen ja laatan vahvuuden toleranssit, saadaan julkaisun: Siltojen kuormat, mukaisella 138 kN/m<sup>2</sup> kuormituksella taulukossa 6.3 esitetyt tulokset.

*Taulukko 6.3. Paalun läpileikkautuminen.*

$p_d$ (kN/m <sup>2</sup> )	Kuorman kerääntymisalue (m <sup>2</sup> )	Lävistyskartion alue (m <sup>2</sup> )	d (m)	Laskenta-kuorma murtorajatilassa, $V_d$ (kN)	Lävistyskapasiteetti $V_c$ (kN)
138,42	6,985	0,753	0,284	<b>863</b>	<b>692</b>

Taulukosta 6.3 huomataan, ettei laatan lävistyskapasiteetti riitä. Koska paalulaatta on ainakin toistaiseksi pysynyt ehjänä, voidaan rakenteen kokonaisvarmuuden murtoa vastaan katsoa kuitenkin pysyneen yli 1.

Laatan taivutusmomentit on ratkaistu Tassu-ohjelmiston laatta-ajolla. Näiden perusteella on edelleen ratkaistu halkeamaleveys laatan eri osissa. Taulukossa 6.4. on esitetty suunnitelmien mukainen tarkastelu laatan halkeilun suhteen.

#### 6.4. Suunnitelmien mukainen halkeamatarkastelu.

Tarkastettava kohta	betonipeite c (mm)	Lyhytaikaiset kuormat			Pitkäaikaiset kuormat		
		$M_k$ (MNm)	$W_k$ (mm)	$W_{ksall}$ (mm)	$M_k$ (MNm)	$W_k$ (mm)	$W_{ksall}$ (mm)
laatan kohta, keskialue, alapinta, $M_{yy}$	60	0,018	0,435	0,450	0,010	0,227	0,300
laatan kohta, keskialue, alapinta, $M_{xx}$	60	0,020	0,437	0,450	0,012	0,233	0,300
sienen kohta, keskim. paa-lut, yläpinta, $M_{yy}$	60	0,092	0,364	0,450	0,070	0,287	0,300
sienen kohta, keskim. paa-lut, yläpinta, $M_{xx}$	60	0,096	0,350	0,450	0,072	0,272	0,300
sienen kohta, reunim. paa-lut, yläpinta, $M_{yy}$	60	0,039	0,266	0,450	0,039	0,272	0,300
sienen kohta, reunim. paa-lut, yläpinta, $M_{xx}$	60	0,035	0,251	0,450	0,033	0,246	0,300

Paalulaatan keskialueen, ohuemman laattaosan alapinnan halkeamaleveyttä laskettaessa betonipeite c on ollut todellista suurempi. Betonipeitteen nimelisarvoksi saadaan vähentämällä betonipeitteen arvosta 50 mm raudituksen sallittu mittapoikkeama 10 mm. Näin saadulla 40 mm betonipeitteellä sallittu halkeamaleveys lyhytaikaisille kuormille olisi ollut 0,343 mm ja pitkäaikaisille 0,229 mm. Laskettu halkeamaleveyden arvo pienenisi myös kappaleessa 4.3.5 esitetyn kaavan 4.19 mukaan hieman, mutta kuitenkin suhteellisesti sallittua halkeamaleveyttä vähemmän. Lisäksi taivutusmomentin laskennassa käytetty pystykuormitus on liian pieni. Tämä olisi osaltaan kasvattanut saatua halkeamaleveyttä.

Verrattiinpa laskelmien halkeamaleveyttä laatan suunnittelun aikaisten tai vuoden 2005 alusta voimaanstuneiden määräysten sallittuihin halkeamaleveyksiin, voidaan sallitun halkeamaleveyden olettaa ylittävän ainakin paalulaatan keskiosilla, ohuemman laattaosan alapinnassa. Tällöin paalulaattarakenteen elinkaari voi jäädä suunniteltua 100 vuotta lyhyemmäksi.

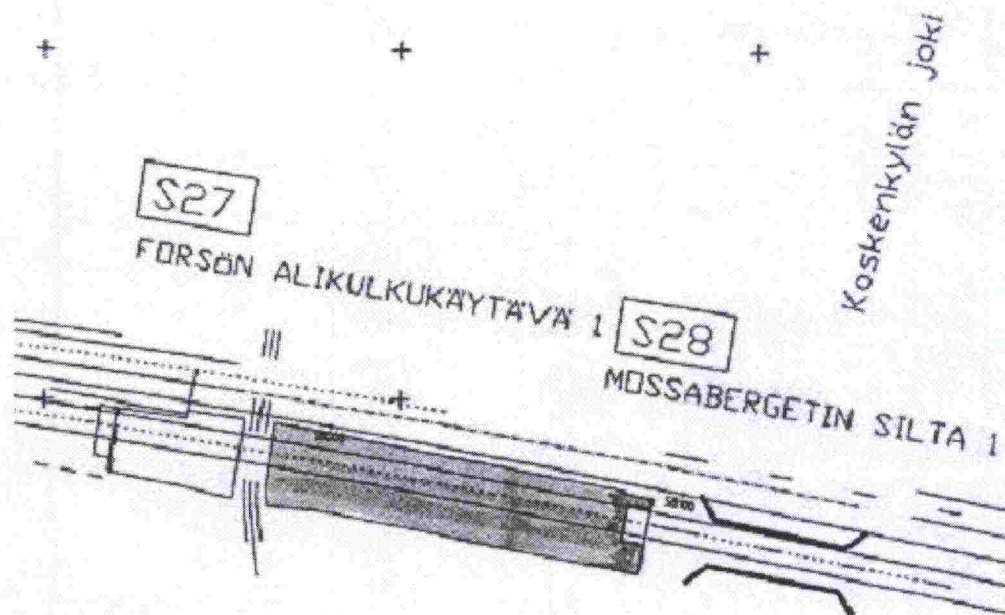
## 6.4 Valtatien 7 (E18) parantaminen moottoritieksi välillä Porvoo – Koskenkylä

### 6.4.1 Kohteen kuvaus

Esimerkkitapauksena 3 käytetään moottoritien (E18) oikean puoleisen ajoradan paalulaattaa numero 11, joka liittyy Koskenkylän joen ylittävään Mos-



sabergetin siltaan, tämän länsipuolelta. Toisesta päästään paalulaatta liittyy Forsön alikulkukäytävään. Pohjoisessa paalulaatta 11 liittyy aiemmin rakennettuun, entisen valtatie 7 paaluhatturakenteeseen. Paalulaattarakenteen sijainti on esitetty kuvassa 6.6. Suunnitelmat kohteeseen on tehty vuonna 2000.



Kuva 6.6. Paalulaatan 11 sijainti kartalla.

Paalulaatta sijoittuu paaluvälille 57984 – 58092 eli on pituudeltaan noin 108 metriä. Laatan yläpinnan korkeusasema vaihtelee pituusleikkauksessa tasolla  $+0,2...+1,35$ , laatan mukaillessa maanpinnan muotoja. Alustäytön paksuus on enimmillään noin 0,5 metriä. Paalulaattarakenteen pengerkorkeus vaihtelee välillä  $5,0...6,1$  metriä.

Paalulaatan pituusleikkaus on esitetty liitteen 2 kuvassa 3 ja poikkileikkaus, josta nähdään myös liittyminen viereiseen paaluhatturakenteeseen, liitteen 2 kuvassa 4.

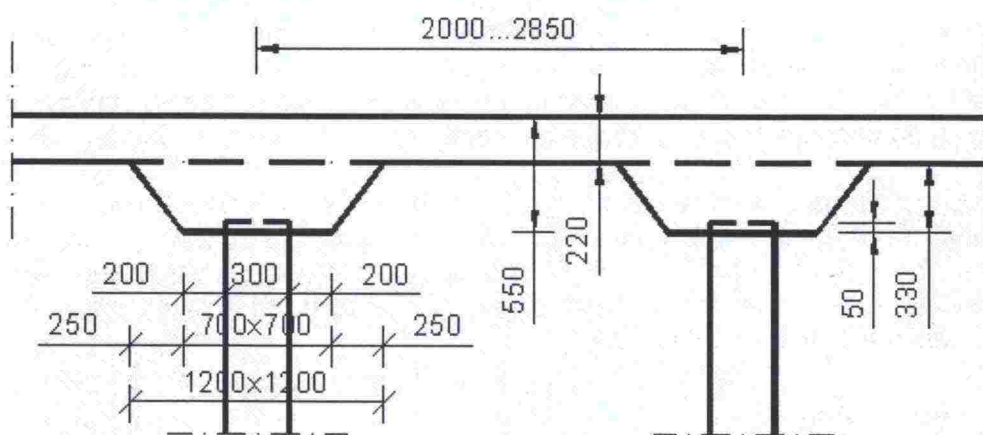
Kohteesta on tehty 30 heijarikairaus, 9 painokairaus, 2 porakonekairaus ja siipikairaukset 1 pisteessä. Lisäksi kohteesta on tehty maanäytetutkimuksia kolmesta pisteestä. Kahdesta pisteestä on määritetty maakerrosten vesipitoisuus. Lisäksi käytettävissä on ollut lukuisia viereisen paaluhatturakenteen rakentamisen yhteydessä tehtyjä kairauksia ja näytetietoja.

Kohteen pohjatutkimukset ovat jopa tavallista kattavampia. Ne ovat kuitenkin kohteen pohjasuhteet huomioiden perusteltuja, eteenkin tilanteessa, jossa aiemmin rakennetun paaluhatturakenteen toimivuus pyritään turvaamaan.

Pohjasuhteiltaan kohde on vaikea. Paalulla 58080 maanpinnassa on noin 2 metriä leikkauslujuudeltaan  $15...20$  kPa vaihtelevaa liejuista silttiä. Tämän alla on  $5...7$  metriä leikkauslujuudeltaan  $12...22$  kPa vaihtelevaa liejuista savea. Liejuisen savea redusoitu leikkauslujuus on osittain kuitenkin alle  $10$  kPa, maakerroksen vesipitoisuuden ollessa enimmillään  $174\%$ . Liejuisen savea alla on  $1...3$  metriä leikkauslujuudeltaan  $15$  kPa olevaa lihavaa savea.

### 6.4.2 Rakenne

Laatan paksuutena on käytetty 220 mm ja sienen paksuutena 550 mm. Paa-lun upotussyvyys on 50 mm. Rakenteen vinopaalujen kaltevuuksina on käy-tetty 3,5:1, 4:1, 5:1, 6:1 ja 10:1. Rakenteessa käytetyt mitat on esitetty ku-vassa 6.7.



Kuva 6.7. Sienilaatan mitat.

Laatan pohjoispuoli on raudoitettu kahdessa tasossa. Eteläpuolella laatta on raudoitettu keskeisesti yhteen tasoon. Kahteen tasoon raudoitetulla osalla, laatan poikkisuunnassa paalukaistan yläpinta on raudoitettu  $\phi 16k120$  ja alapinta  $\phi 12k190$ . Laatan pituussuunnassa paalukaistan yläpinta on raudoitettu  $\phi 12k175$  ja alapinta  $\phi 12k230$ . Välikaista on laatan poikkisuunnassa raudoi-



tettu yläpinnastaan  $\phi 16k150$  ja alapinnastaan  $\phi 12k250$ . Laatan pituussuunnassa välikaistan ylä- ja alapinta on raudoitettu  $\phi 12k200$ . Keskeisesti raudoitettulla osalla paalukaista on laatan poikkisuuntaan raudoitettu  $\phi 16k130$  ja pituussuuntaan  $\phi 16k170$ . Välikaista on laatan poikki- ja pituussuuntaan raudoitettu  $\phi 12k150$ .

Betoniterästen asennustoleranssit ovat kahteen tasoon raudoitettulla osalla seuraavat: alapinnan teräkset  $-0...+15$  mm ja yläpinnan teräkset  $-15...+0$  mm. Keskeisesti raudoitettulla osalla toleranssit ovat seuraavat: kentän keskellä  $+0...-15$  mm sekä tuella ja reunassa  $+15...-0$  mm.

Kuivatus laatan keskiosilla toimii 100 mm putkilla, joita asennetaan 1 kpl välikaistan keskikohtaa kohden. Paalulaatan päissä kuivatus toimii laatan pituussuuntaisella kallistuksella.

Laatan suojakerros on paksuudeltaan 500 mm ja se on rakennettu kivennäismaasta, jonka raekoko on enintään 200 mm.

### 6.4.3 Rakenteen toimivuuden arviointi

#### Geotekninen toimivuuden arviointi

Paalulaatan ulkopuolelle jäävän pengerosan varmuus on kappaleen 4.2.1 mukaisesti laskettaessa yli 2,5.

Laatan korkeusasema on maanpinnan korkeuden suhteen valittu oikein. Kun käytetään paalulaatan alustäytön paksuutena 0,5 metriä, tilavuuspainona  $\gamma=18$  kN/m<sup>3</sup> ja painuvan kerroksen paksuutena  $D=13$  metriä, saadaan paalun negatiiviseksi vaippahankaukseksi noin 55 kN. Tämä on likimain samansuuruinen lyhytaikaisen kuormituksen kanssa, jolloin negatiivista vaippahankausta ei paaluja mitoitettaessa tarvitse huomioida. Lisäksi paalulaatan alustäyttö on pääosin edellä mainittua ohuempi.

Valualustan painuman voidaan ajallisesti odottaa tapahtuvan hitaasti. Paalulaatan ohuen alustäytön vuoksi voidaan pystysuoran jännityslisäyksen katsoa olevan varsin pieni kuivakuorikerroksen konsolidaatiojännitykseen nähden. Valualustan painuman voidaan näin olettaa pysyvän betonin sitoutumisen aikana sallittua 5 mm pienempänä.

#### Rakenteellisen toimivuuden arviointi

Rakenteen läpileikkautuminen pitää tutkia sekä paalun että laatan sieniosan reunojen suhteen. Läpileikkautuminen tarkastetaan sekä paalulaatan keskeisesti raudoitettulta että kahteen tasoon raudoitettulta osalta. Laskennassa oletetaan lisäksi paalujen sijaintipoikkeamien toteutuvan läpileikkautumisen kannalta paalukuormaa eniten kasvattavalla tavalla, jolloin paaluväli kasvaa sekä pituus- että poikkisuunnassa suunnitelmien sallimat 200 mm. Lisäksi on huomioitu raudoituksen sallitut mittapoikkeamat. Taulukoissa 6.5 ja 6.6 on esitetty läpileikkautumistarkastelun tulokset.

*Taulukko 6.5. Paalun ja sieniosan reunojen läpileikkautuminen keskeisesti raudoitetulla osalla.*

Tarkasteltava kohta	Paalukuorma (kN/m <sup>2</sup> )	Laskentakuorma murtorajatilassa, V <sub>d</sub> (kN)	Lävistyskapasiteetti V <sub>c</sub> (kN)
Paalu	1023	830	987
Sieniosan reunat	1023	692	790

*Taulukko 6.6. Paalun ja sieniosan reunojen läpileikkautuminen kahteen tasoon raudoitetulla osalla.*

Tarkasteltava kohta	Paalukuorma (kN/m <sup>2</sup> )	Laskentakuorma murtorajatilassa, V <sub>d</sub> (kN)	Lävistyskapasiteetti V <sub>c</sub> (kN)
Paalu	1023	809	1107
Sieniosan reunat	1023	665	1005

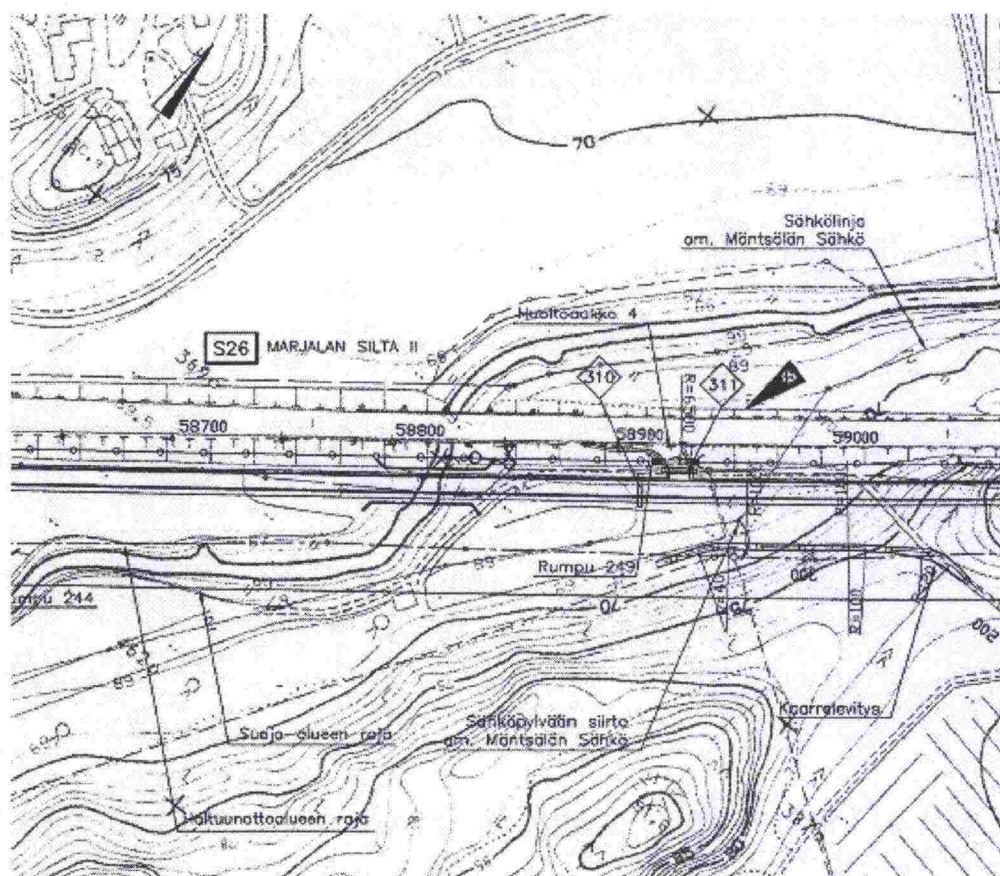
Kuten taulukoista 6.5 ja 6.6 huomataan, ei paalun tai sienien leikkautumisvaara ole ja rakenne läpileikkautumisen suhteen täyttää betonirakenteille määrätyt vaatimukset.

## 6.5 Vt 4 (E75) parantaminen moottoritieksi välillä Järvenpää – Lahti

### 6.5.1 Kohteen kuvaus

Esimerkkitapauksena 4 käytetään E8 Mäntsälän pohjoisesta eritasoliittymästä Lahteen päin sijaitsevia, oikeanpuoleisen ajoradan, Marjalan sillan S26 tulopenkereiden taustalaattoja. Suunnitelmien mukaisesti paalulaatat ovat tyypiltään osittain hattulaattoja ja osittain sienilaattoja. Suunnittelu kohteeseen on tehty vuonna 1997. Kohteen sijainti on esitetty kuvassa 6.8.





Kuva 6.8. Kohteen sijainti.

Marjalan sillan luonaan puoleinen paalulaatta sijoittuu paaluvälille 58600 – 58790 ja koillisen puoleinen paalulaatta paaluvälille 58820 – 58900. Pengerkorkeus paalulaatoilla vaihtelee pääosin 2,1...2,25 metrin välillä, kasvaen siltaan liittyessä noin 4,5 metriin. Molemmat paalulaatat liittyvät maanvaraiseen tiepenkereeseen pengerkevennetyin 5 metrin siirtymälätoin. Liitteen 2 kuvassa 5 on esitetty poikkileikkaus paalulta 58640.

Pohjasuhteiltaan kohde on vaikea. Paalulla 58640 maanpinnassa on noin 12...16 metriä paksu lujuudeltaan 5...25 kPa vaihteleva liejuinen savikerros, jonka yläosa on noin 1 metrin paksuudelta kuivakuorta. Tämän alla on 0,5...11 metriä paksu tiiveydeltään pääosin keskitiivis kitkamaakerros. Kallionpinta vaihtelee poikkileikkauksessa erittäin jyrkästi tasolla +53...+40.

## 6.5.2 Rakenne

Laattaosat, joilla pengerkorkeus vaihtelee välillä 2,1...2,25 metriä on suunnitelmissa esitetty perustettaviksi teräsbetonisilla 250\*250 mm<sup>2</sup> tai vaihtoehtoisesti 300\*300 mm<sup>2</sup> II-luokan tukipaaluilla. Sallittu paalukuorma on tällöin kuitenkin laskettu paalutusluokan 1B mukaan. Laattaosat, joilla pengerkorkeus kasvaa noin 4,5 metriin on suunnitelmissa esitetty perustettaviksi 1B-luokan tukipaaluilla.

Laatta on mitoitettu rakenneluokassa 1, käyttäen betonina K40-1 ja betoniteräksinä A500HW. Sienien kohdalle on suunniteltu leikkausraudoitus teräs-

verkosta B500K. Raudoitteiden betonipeitteenä rakenteessa on käytetty 50 mm.

Suunnitelmissa esitetty laatan paksuus vaihtelee käytetyn paalukoon ja paaluvälin mukaisesti. Laatan rakenne on esitetty liitteen 2 kuvassa 6.

### 6.5.3 Rakenteen toimivuuden arviointi

#### Geotekninen toimivuuden arviointi

Kallionpinnan kaltevuudesta (kuva 6.14) johtuen teräsbetonisten tukipaalujen toimivuus on kohteessa erittäin kyseenalaista. Kallionpinnan ollessa jyrkkä, kestävät teräsputki- tai porapaalut teräsbetonisia paaluja huomattavasti paremmin paalun alapäähän paalua lyötäessä mahdollisesti kohdistuvaa taiputusta.

Teräsbetonisten II-luokan paalujen mitoittaminen paalutusluokassa 1B voi olla paalun toimivuuden kannalta vahingollista, etenkin kun hoikat 250\*250 mm<sup>2</sup> paalut usein halkeilevat jo paalua pystyyn nostettaessa. Halkeillut paalu kestää huonosti rasituksia, joita kiristyneiden loppulyöntiehtojen täyttämiseksi tarvittavat lyöntimäärät niille aiheuttavat. Lisäksi 250\*250 mm<sup>2</sup> paalut kestävät erittäin huonosti paalun yläpään siirtymiä, joita paalutuskoneen liikkuminen leikkauslujuudeltaan heikolla pohjamaalla voi aiheuttaa.

#### Rakenteellisen toimivuuden arviointi

Rakenteen läpileikkautuminen tutkitaan sekä paalun että laatan sieniosan reunojen suhteen. Läpileikkautuminen tarkastetaan pengerkorkeudella 2,25 metriä kuvassa 6.15 esitetyille paaluvälin maksimiarvoille. Liikennekuormana (Ek1) tarkasteluissa on käytetty julkaisun: Siltojen kuormat, mukaisen kuormitusjakauksen aiheuttamaa 40 kPa kuormitusta. Taulukoissa 6.7 on esitetty läpileikkautumistarkastelun tulokset.

*Taulukko 6.7. Paalun ja sieniosan reunojen läpileikkautuminen, teräsbetonipaalut 250\*250 mm<sup>2</sup> ( $P_{sall}=562$  kN).*

Tarkasteltava kohta	Paaluväli (m)	Paalukuorma (kN) murto-rajatilassa	Laskenta-kuorma murto-rajatilassa, $V_d$ (kN)	Lävistyskapasiteetti $V_c$ (kN)
Paalu	2,24	583	<b>513</b>	<b>599</b>
Paalu	2,55	886	<b>683</b>	<b>610</b>
Sieniosan reunat	2,24	583	<b>282</b>	<b>820</b>
Sieniosan reunat	2,55	886	<b>329</b>	<b>1079</b>

Taulukosta 6.7 havaitaan, että laatan lävistyskapasiteetti ylitetään paalun kohdalla paaluvälin ollessa 2,55 metriä. Toisaalta kokonaisvarmuus paalun läpileikkautumiseen nähden on edelleen noin 1,6. Lisäksi tarkastelussa käy-



tetty liikennekuormitus on jonkin verran vuonna 1997 voimassa olleiden suunnitteluohjeiden mukaista kuormitusta suurempi.

Lisäksi paalulaatan osalta tarkastellaan laatan halkeamaleveyttä niin paalun kohdalla laatan yläpinnasta kuin kentän keskeltä laatan alapinnasta. Tarkasteluissa on käytetty edellä läpileikkautumistarkasteluissa käytettyjä liikennekuormitusta sekä pengerkuormitusta ja ne on tehty likimääräistä sauvaelementtimallia käyttäen. Taulukossa 6.8 on esitetty halkeama tarkastelun tulokset.

*Taulukko 6.8. Paalulaatan halkeamatarkastelu.*

Tarkasteltava kohta	Paaluväli (m)	$M_{kp}$ (kNm)	$M_{kl}$ (kNm)	Halkeamaleveys (mm), pitkäaikaiset kuormitukset	Halkeamaleveys (mm), lyhytaikaiset kuormitukset
Paalu, laatan yläpinta	2,24	40	60	<b>0,61</b>	<b>0,66</b>
Kenttä, laatan alapinta	2,24	10	15	<b>0,59</b>	<b>0,69</b>
Paalu, laatan yläpinta	2,55	65	90	<b>0,94</b>	<b>0,97</b>
Kenttä, laatan alapinta	2,55	15	20	<b>0,93</b>	<b>0,93</b>

Taulukosta 6.8 havaitaan, että laatan halkeamaleveys ylittää sallitun halkeamaleveyden molemmilla paaluväleillä sekä paalun kohdalla laatan yläpinnassa että kentän keskellä laatan alapinnassa. Laatan sallittu halkeamaleveys on suunnittelun aikana voimassa olleiden määräysten mukaan pitkäaikaisille kuormille 0,3 mm ja lyhytaikaisille kuormille 0,45 mm. Paalulaattarakenteen käyttöikä voi näin ollen jäädä tavoiteltua 100 vuotta lyhyemmäksi.

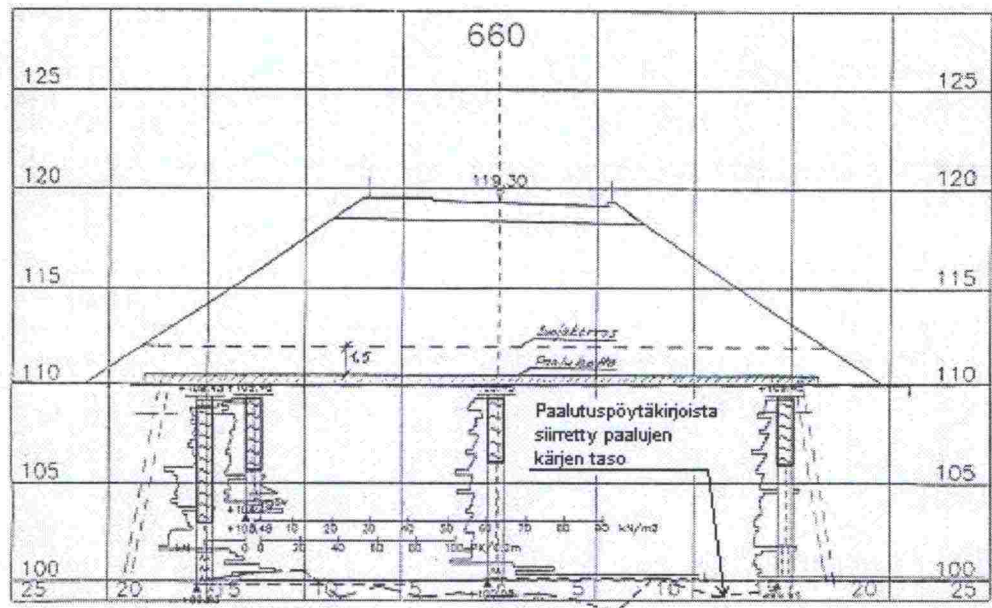
## **6.6. Multisilta**

### **6.6.1 Kohteen kuvaus**

Esimerkkitapauksena 4 käytetään Tampereella sijaitsevan Multisillan ylikusiltaan liittyvää pengerlaattaa. Pengerlaatta on tyypiltään hattulaatta, missä elementti valmisteisten paaluhattujen päälle urakoitsijan omilla suunnitelmilla on rakennettu ohut paikalla valettu pintalaatta. Hattulaatta on rakennettu loppuvuodesta 1994. Rakenne on sittemmin, jäljempänä esitetyistä syistä romahtanut. Rakenteen romahtaminen on todettu vuonna 1999.

Hattulaatta sijoittuu sillan jälkeiseen kaarteeseen paaluvälille 640 – 700. Sen pengerkorkeus on 9...9,5 metriä.

Kohde on ollut pohjasuhteiltaan hyvin vaativa. Paalulta 660 tehtyjen kairauksen mukaan maanpinnassa on 3,5...6 metriä turvetta. Turpeen alla on 1,5...4 metriä lujuudeltaan pehmeää savea. Saven alla on 1...2 metriä löyhää silttiä tai moreenia. Kairaukset ovat päättyneet noin tasolla +100,0 kiiven tai kallioon. Kairaustulokset paalulta 660 on esitetty kuvassa 6.9.



Kuva 6.9. Suunnitelmien mukainen poikkileikkaus paalulta 660.

### 6.6.2 Rakenne

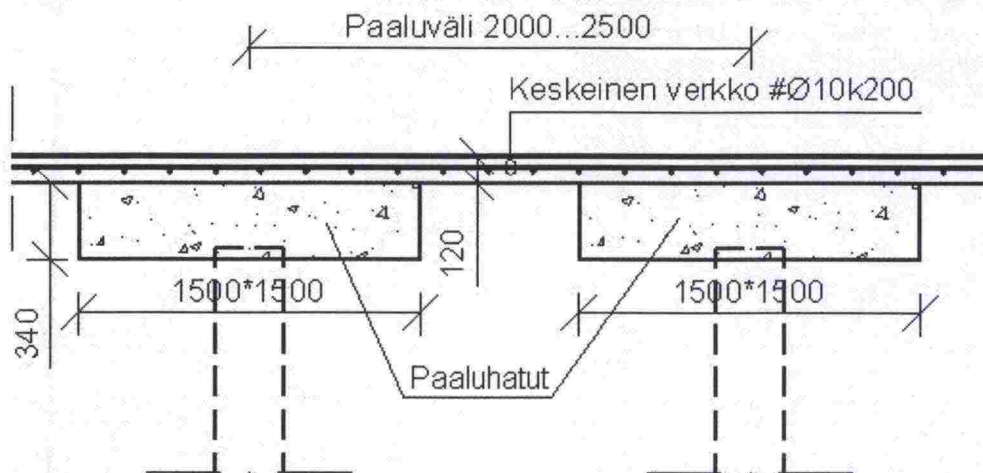
Kohteen suunnitteluvaiheessa voimassa ovat olleet ohjeet: Pengerlaatat ja Pengerpaalutus. Julkaisu: Pengerpaalutus on sittemmin korvattu julkaisulla: Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnitteluohje.

Hattulaatta on perustettu teräsbetonisilla  $300 \times 300 \text{ mm}^2$  tukipaaluilla. Paalut on mitoitettu paalutusluokassa 1b ( $P_{\text{sall}} = 810 \text{ kN}$ ). Paaluina on kuitenkin käytetty paalutusluokan II  $300 \times 300 \text{ mm}^2$  normaalipaaluja, eikä paalutuksen tarkastustoimenpiteitä (PDA) ole tehty Lyöntipaalutusohjeiden (LPO-87) vaatimalla, paalutusluokkaan 1b liittyvällä tavalla. Vinopaalujen kaltevuus oli 6:1.

Paalujen päihin on asennettu elementti valmisteiset paaluhattut, pääosin kooltaan  $1500 \times 1500 \times 340 \text{ mm}$ . Paikoin on käytetty kooltaan  $1800 \times 1800 \times 400 \text{ mm}$  paaluhattuja. Paaluhattut on valmistettu betonista K40-1 ja betoniteräksenä on käytetty A500HW. Paaluhattujen suojabetonipaksuutena on käytetty 35 mm.

Paaluhattujen päälle on valettu ohut 120 mm paksu pintalaatta. Betonina on käytetty K40-1 ja raudoituksena A500HW. Laatta on raudoitettu keskeisesti verkolla  $\# \phi 10 \text{ k}200$ . Rakenteen mitat ja rauditus on esitetty kuvassa 6.10.





Kuva 6.10. Rakenteen mitat ja raudoitus.

Paaluväli hattulaatan suunnitelmissa vaihteli pääsääntöisesti välillä 2000...2500 mm, ollen kuitenkin paikoin tätä pienempi hattulaatan kaarevan muodon vuoksi. Paalujen ja hattulaatan reunan välinen etäisyys on 1200 mm.

### 6.6.3 Syyt rakenteen vaurioitumiseen

Hattulaatan toteutus suunnitelmat ja rakennustyö eivät noudata suunnittelun aikana voimassa olleita tai nykyisiä suunnitteluohjeita. Tämä on johtanut rakenteen romahtamiseen.

Hattulaatan progressiivinen sortuma alkoi noin paalulta 670. Katselmuksien, mittauksien, laatan esiin kaivun ja kairauksien tuloksena voidaan esittää liitteen 2 kuvan 7 mukainen poikkileikkaus hattulaatan romahtamisen jälkeisestä tilanteesta.

Syitä hattulaatan romahtamiseen on myöhemmin vuosien 2000 – 2001 aikana arvioitu useiden asiantuntijoiden taholta. Eri lausunnoissa esitetyt näkökohdat suunnitelmien heikkouksista ja rakentamisen aikaisista virheistä voidaan yhteenvetona summata seuraavasti:

- Hattulaatan ohut, paikalla valettu pintalaatta on rakenteellisesti kuormituksiin nähden liian heikko
- Paaluhatun ja pintalaatan yhteistoiminta valusauman välityksellä on varsin kyseenalaista. Kokonaan paikalla valettu sienilaatta kestää monoliittisuudestaan johtuen huomattavasti hattulaattaa paremmin taivutusta ja halkeilua
- Hattulaatasta puuttuivat paaluhatut muutaman paalun kohdalta, jolloin läpileikkautumiskapasiteetti on huomattavasti suunniteltua pienempi
- Alustäyttö on rakennusvaiheessa painunut, jolloin sitä on edelleen kasvatettu (alustäyttö keskimäärin 4 metriä). Tämä on aiheuttanut negatiivisen vaippahankauksen muodossa paaluille pysyvän noin 200 kN kuormituksen

- Paaluvälin ollessa 2,2 m, pengerkorkeuden 9,5 m ja pengerateriaalin tilavuuspainon  $\gamma=21 \text{ kN/m}^3$  saadaan hattulaatan paaluille pysyväksi kuormaksi noin 1000 kN. Kun vielä huomioidaan paalujen negatiivinen vaippahankaus, yhden paalun läpileikkautumisen viereisille paaluille aiheuttama lisäkuormitus ja paalujen 0,2 metrin sijaintipoikkeamat, päädytään maksimissaan noin 1500 kN paalukuormaan. Tällaista kuormitusta ei paalu edes pelkän puristuksen osalta kestä, mikä voi laukaista vaihteittain etenevän sortuman
- Paalutustyö on tehty ainakin osittain suoraan paaluhattujen päältä. Tämä on aiheuttanut paaluille siirtymiä ja taivutusta, minkä vuoksi osa paaluista on mahdollisesti rikkoutunut jo rakennusvaiheessa
- Suunnitelmiin nähden ylikorkean, hattulaatan ulkopuolisen luiskatäytön painuminen aiheuttaa reunimmaisille vinopaaluille liian suurta sivukuormitusta. Maakerroksen ollessa turvetta, on maan paalulle antama sivutuki olematon, jolloin paalun sivukuormituksen aiheuttama taivutus kasvaa entisestään

Hattulaatan suunnitteluun ja rakentamiseen liittyvät virheet olivat edellä listatun mukaisesti varsin moninaisia. Jo yksikin edellä mainituista virheistä olisi voinut aiheuttaa paalulaatan progressiivisen sortuman. Tästä voidaan päätellä, että paalulaattarakenne teräsbetonirakenteeksi varsin hauraana rakenteena pitää erityisesti suunnitella, mutta myös rakentaa voimassa olevien määräysten mukaisesti.

Lisäksi on huomioitava hattulaatan rakenne ja sen toimintatapa. Kyseessä ei ole paalulaatta, vaan ennemminkin yhteen valettu paaluhatturakenne. Paaluhatturakennetta ei kuitenkaan saa käyttää eloperäisten maalajien alueella, eikä kohteissa, joissa pohjamaan leikkauslujuuden arvo on sillan tulopenkereessä  $< 20 \text{ kPa}$ . Näin ollen ko. hattulaatta ei täytä paalulaatoille tai paaluhatturakenteille asetettuja rakenteellisia tai geoteknisiä vaatimuksia.



## 7. KORJAUSSUUNNITTELU

### 7.1 Yleistä

Paalulaattojen korjausrakenteissa aiheuttavat liikenteen hoito ja toimivuus usein varsinaisia rakennuskustannuksia suuremmat kustannukset. Tämän vuoksi etenkin radoilla, mutta myös teillä pyritään entistä nopeammin tehtäviin korjausrakenteisiin.

Paalulaattarakenteiden vaurioiden syyt ovat yksilöllisiä ja kohteesta riippuvia. Koska vaurioituneiden paalulaattarakenteiden korjausmenetelmistä ei ole vakiintunutta käytäntöä, voidaan näiden korjaamiseksi esittää useita ja varsin eritasoisia korjausmenetelmiä. Korjausmenetelmistä, joita esimerkiksi Jari Mara on käsitellyt diplomityössään: Puupaaluilla perustettujen tierakenteiden vauriot ja korjausmenetelmät /3/, rakenteen 100 vuoden käyttöiän kannalta riittäviä ovat usein vain joko rakenteen täydellinen korjaaminen tai korvaaminen uudella paalulaatta- tai siltarakenteella.

Paalulaattarakenteessa esiintyvät vauriot syntyvät yleensä jo rakennusvaiheessa tai välittömästi tämän jälkeen. Vaurioitumisen syyt liittyvät useimmin joko tietämättömyyteen tai laiminlyönteihin suunnittelussa tai rakennustyössä. Yhteenvetona mainittakoon yleisimmät paalulaattarakenteille vaurioita aiheuttavat tekijät:

- Liian paksun luiskatäytön tai muun täytön reunapaaluille aiheuttama taivutus
- Laiminlyönnit suunnitelmien mukaisen rakennustyön tekemisessä
- Paalujen läpileikkautumisen kannalta liian ohuen laattapaksuuden valinta
- Laatan halkeilun kannalta liian ohuen laattapaksuuden valinta
- Paalujen sallitut sijaintipoikkeamat ylittävien poikkeamien laatalle aiheuttamat lisärasitukset

### 7.2 Vaurion ilmentyminen

Koska paalulaattarakennetta peittää vähintään noin 1,5 metrin penger, on laatan tai paalujen varsinaista vaurioitumista vaikea havaita. Laatan tai paalujen vaurio on usein tapahtunut jo paljon ennen, ennen kuin vauriosta saadaan minkäänlaisia merkkejä. Syynä tähän mainittakoon vaurioituneen paalun viereisten paalujen toimivuus kuormituslisäyksistä huolimatta, pengermaateriaalin holvautuminen ja tämän hidas purkautuminen sekä tierakenteissa sidotun päällismateriaalin jännityksiä jakava vaikutus.

Paikallisen vaurion merkit ilmenevät yleensä myöhään. Kun taas vaurio on luonteeltaan progressiivinen, nähdään vaurion merkit nopeammin, useimmin penkereen täydellisenä sortumana. Paalulaatan progressiivisen sortuman aiheuttaa yleensä paalun läpileikkautuminen tai katkeaminen. Tällöin viereisten paalujen kuormitus kasvaa liian suureksi ja vaurio etenee. Liikenteen turvallisuuden kannalta vaarallisimpia ovat juuri luonteeltaan progressiiviset vauriot.

## 7.3 Korjausmenetelmät ja niiden vaikutus rakenteen elinkaareen

### 7.3.1 Epäsuorat korjausmenetelmät

Epäsuorilla korjausmenetelmillä tarkoitetaan vaurioituneen paalulaattarakenteen korjausmenetelmiä, joilla ei korjata itse vauriota vaan pyritään tämän etenemisen hidastamiseen. Epäsuoria korjausmenetelmiä voidaan käyttää vain kohteissa, joissa laatan vauriot on havaittu paikallisiksi, eikä penkereellä katsota olevan sortumavaaraa.

Käytännössä paalulaattarakenteen epäsuora korjaus voidaan toteuttaa kolmella tapaa: vaurioituneen rakenteen kuormituksen pienentämisellä, kuormitusten siirtämisellä tai tasoittamalla vaurion aiheuttamia painumia esimerkiksi erilaisia lujitteita käyttäen. Epäsuoria korjausmenetelmiä, joita käytettäessä korjatulle rakenteelle on erittäin vaikea asettaa käyttöikävaatimuksia, ei voida käyttää radoilla niiden riittävän rataturvallisuuden saavuttamiseksi.

Vaurioituneen paalulaattarakenteen kuormitusta voidaan pienentää esimerkiksi seuraavilla toimenpiteillä:

- Suunnitelmiin nähden ylimääräisiä, luiskiini tai paalulaatan reunoille kasattuja läjitysmaita poistamalla
- Tasausta alentamalla (pengerkorkeus kuitenkin vähintään 1,5 m)
- Penger materiaalien osittaisella korvaamisella, esimerkiksi kevytsoral-la, dynaamisesti vähän kuormitetuilla penkereillä
- Päällistykseen epätasaisuuksien tasoittamisella

Näistä viimeksi mainitulla pyritään tien epätasaisuuksien ajoneuvoille aiheuttamien pystykuormitusten pienentämiseen. Kuitenkin, jos tien epätasaisuus vain tasoitetaan uudella päällysteellä korjaamatta itse painumaa aiheuttavaa vauriota, vähenevät tien epätasaisuuksista aiheutuvat kuormitukset vain lyhytaikaisesti. Useasti toistettuna päällisteen korjaaminen lisää paalulaatalle kohdistuvia pysyviä kuormituksia ja vain pahentaa tämän vaurioita.

Epäsuorana korjausmenetelmänä voidaan käyttää myös kuormituksen siirtoa pois vaurioituneelta alueelta. Tällöin on kuitenkin muistettava, etteivät siirrettävät kuormitukset aiheuta ehjän laattaosan rikkoutumista. Kuormitusta voidaan siirtää esimerkiksi:

- tien linjausta muuttamalla
- penkereeseen asennettavilla lujitteilla

Kuormituksia siirrettäessä voidaan lisäksi joutua kaventamaan itse liikenteelle tarkoitettua aluetta ja näin heikentämään tien palvelutasoa.

Lisäksi vaurion aiheuttamaa epätasaisuutta voidaan tasoittaa esimerkiksi tien päällysrakenteisiin asetettavilla lujiteverkoilla.

Epäsuorien korjausmenetelmien käyttöikävoitteenksi voitaneen asettaa 5...10 vuotta. Tällöin paalulaattarakenteen vaurion kehittymistä on kuitenkin seurattava penkereen suhteellisia liikkeitä kuvaavan mittausjärjestelmän avulla. Mikäli seurannassa havaitaan penkereen suhteellisten liikkeiden ra-



kentamisajankohdan jälkeen kiihtyvän, on itse paalulaattarakenteen vaurio korjattava.

### 7.3.2 Suorat korjausmenetelmät

Paalulaattarakenteen suoralla korjausmenetelmällä tarkoitetaan paalulaatan vaurioiden täydellistä korjaamista tai koko rakenteen korvaamista. Suorat korjausmenetelmät ovat aina kalliita, mutta niiden ajallinen kesto ja vaikutukset liikennöitävyyteen poikkeavat suuresti.

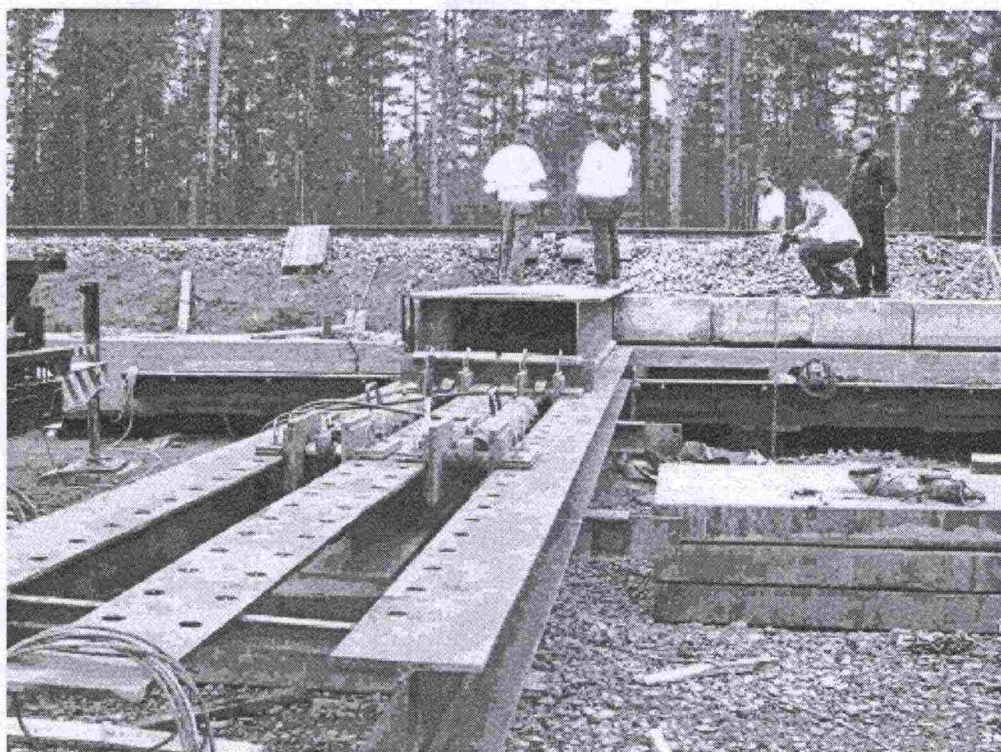
Paalulaatan vaurioita voidaan korjata, mikäli vauriot ovat pysyneet paikallisina. Tällöin vaurioitunut osa laattaa voidaan korvata uudella sekä tehdä mahdollisesti tarvittava lisäpaalutus. Korjaussuunnittelussa on huomioitava toimenpiteiden ehjälle laatta osalle aiheuttamat kuormitukset, kuten työ-konekuormitukset. Korjausmenetelmä on sitä kalliimpi ja aikaa vaativampi, mitä korkeampi penger paalulaattaa kuormittaa.

Suomessa, etenkin radoilla yleisimmin käytetty vaurioituneiden paalulaattarakenteiden korjausmenetelmä on palkkilaattarakaisu. Vaurioituneen rakenteen sivuille rakennetaan ensin paikalla valettavat palkkikaistat. Tämän jälkeen liikennekatkojen aikana kaivetaan penkereeseen tila uutta elementtirakenteista palkkikaistoihin tukeutuvaa laattaa varten. Toimenpide asennuksineen voidaan usein tehdä liikennekatkojen aikana. Humppilan Ermanninsuolla on vaihtoehtoisesti käytetty menetelmää, jossa rakenteen elementtilaatat tunkataan paikoilleen, radan alitse liikennekatkon aikana. Tunkkaus tapahtuu hydraulisesti erityisen teräskaukalon lävitse. Kuvat 7.1 ja 7.2 ovat Humppilan Ermanninsuon rakennustyömaalta.



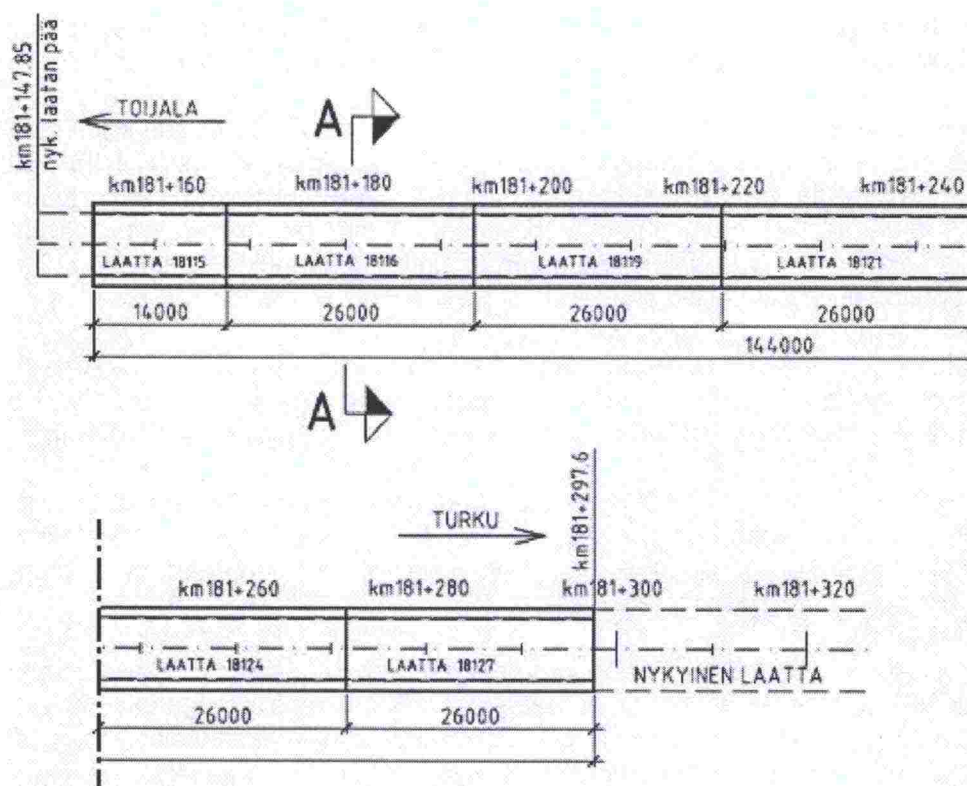
Kuva 7.1. Palkkilaattarakenne Humppilan Ermanninsuolla.





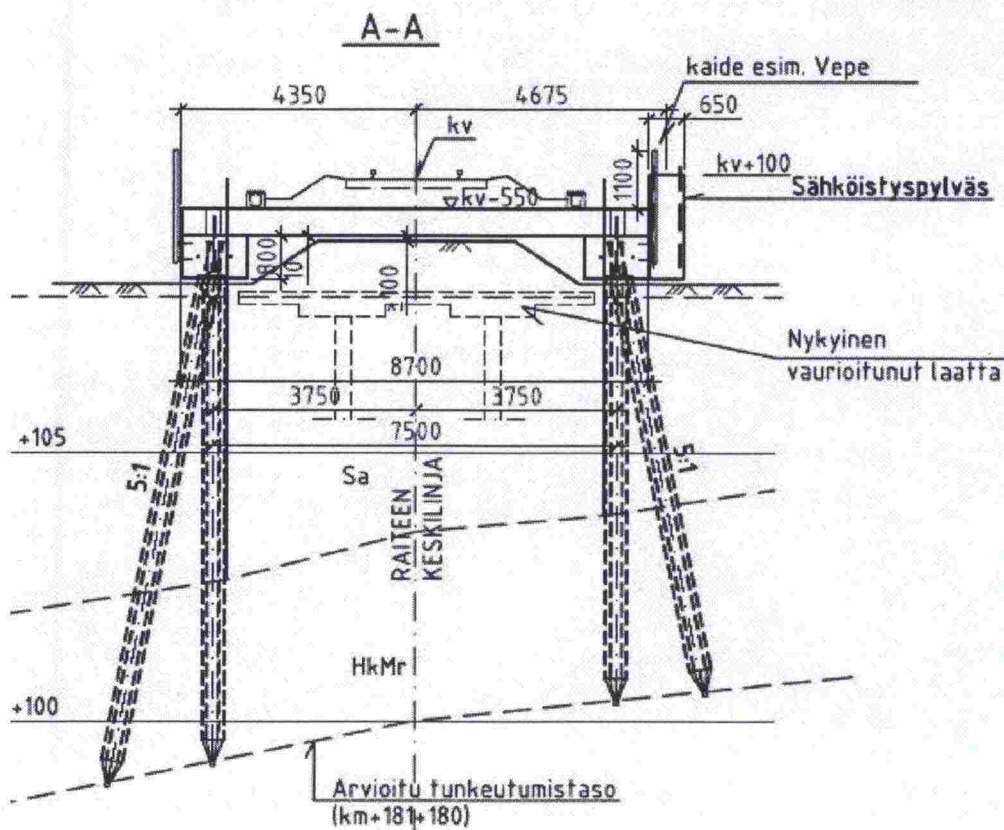
Kuva 7.2. Elementtilaattojen tunkkauksessa käytetty laitteisto.

Siltarakenteina mitoitettujen palkkilaattojen tasokuva on esitetty kuvassa 7.3. Kuva 7.4 esittää rakenteen poikkileikkausta.



Kuva 7.3. Tasokuva Ermanninsuon palkkilaatoista.





Kuva 7.4. Palkkilaattarakenteen poikkileikkaus.

Edellä mainittua palkkilaattaa käytettäessä vältetään myös rikkoutuneen paalulaatan paalujen uudelle paalutukselle aiheuttamilta vaikeuksilta.

Rakentamisen aikaisista toimenpiteistä riippumatta palkkilaatoissa käytetään usein suuriläpimittaisia teräsputkipaaluja. Palkkikaistojen jäykkyydellä voidaan kasvattaa paaluväliä ja näin käyttää paremmin hyödyksi teräsbetonipaaluja kantavampia paalutyyppisiä. Suuriläpimittaisten teräsputkipaalujen mitoitus ja käyttö on tarkemmin käsitelty esimerkiksi julkaisussa: Teräsputkipaalut rautatiesilloissa. /2/

Rakenne itsessään mitoitetaan teillä paalulaattarakenteena pengerkorkeuden ollessa  $\geq 1,5$  metriä ja siltarakenteena kun pengerkorkeus on alle 1,5 metriä. Radoilla paalulaatta- ja siltarakenteen raja on tasolla Kv -1,40 metriä.

Korkeiden penkereiden osalta voidaan korjausmenetelmänä käyttää penkereen yläosaan sijoitettavaa paalulaattaa tai ns. pehmeikkösiltaa, jolloin vältetään koko penkereen purkamiselta. Pehmeikkösillasta puhutaan, kun rakenne mitoitetaan siltarakenteena.

Korvattaessa vaurioitunut paalulaatta penkereen yläosaan rakennettavalla uudella laattalla, on vanha paalulaatta ensin läpäistävä poraamalla. Koska toimenpide on rakennuskustannuksiin nähden suhteellisen kallis, on uusi paalulaatta syytä perustaa suuriläpimittaisia teräsputkipaaluja käyttäen. Suuriläpimittaiset teräsputkipaalut kestävät myös teräsbetonipaaluja paremmin paalun lyönnin aikaisia jännityksiä, vanhan paalutuksen vaikeuttaessa paalu-

tusolosuhteita. Suuriläpimittaisia teräsputkipaaluja varmempi ratkaisu on kuitenkin porapaaletus.

Tilanteissa, joissa pohjamaan kantokyky havaitaan riittämättömäksi paalulaatan ulkopuoleisen pengerosan aiheuttamaan kuormitukseen nähden eikä paalulaatta ole vaurioitunut, voidaan maapohjan kantokykyä parantaa esimerkiksi lujiteverkkoa käyttämällä. Tällöin on kuitenkin varmistuttava, ettei paalulaattaan osittain tukeutuva lujiteverkko aiheuta paalulaatan rakenteellisen kestävyys ylittävää kuormituslisäystä.



## 8. EHDOTUS YHTENÄISISTÄ SUUNNITTELUPERIAATTEISTA

### 8.1 Käyttöalueet

Paalulaattarakenteiden käyttöalueina voidaan pitää vaikeasti paalutettavia pohjasuhteita sekä korkealuokkaisia väyliä, joille sallitaan vain vähäisiä painumia. Paalulaattarakenne on penkereen perustamismenetelmä, joka ei aiheuta painumia ja jolla siten saadaan tasainen tie, rata, katu tai pihat. Tästä on etua esimerkiksi kunnossapidon kannalta.

Paalulaattaa on erityisesti käytettävä syvillä, turvetta tai liejua sisältävillä pehmeiköillä. Paalulaattaa voidaan käyttää myös, mikäli teknisesti toimivilla, vaihtoehtoisilla perustamismenetelmillä ei saavuteta huomattavaa taloudellista etua paalulaattarakenteeseen nähden. Paalulaattarakenteen käyttö on tällöin rakenteen koko elinkaaren kustannukset huomioiden perusteltua.

Pohjamaan leikkauslujuuden vähimmäisarvoa ei paalulaattarakenteille yksiselitteisesti voida määrittää, etenkin kun rakentamisajankohdan tai paalutuskaluston valinta voi merkittävästi vaikuttaa paalutuksen sekä laatan valun toteutettavuuteen. Pohjamaan ollessa sula massiivista, teräsbetonipaalujen lyöntiin tarkoitettua paalutuskonetta käytettäessä on työalustan ja kuivakuoren jaettava paalutuskoneen paino maapohjalle niin, että tämän kantokyky on riittävä. Pohjamaan redusoidun, suljetun leikkauslujuuden vähimmäisarvona voidaan kuitenkin pitää 10 kPa.

Myöskään pohjamaan leikkauslujuuden ylärajaa ei paalulaattarakenteen käyttöalueelle voida määrittää. Paalulaattarakenteen käyttöalue suhteessa sille vaihtoehtoisiin perustusmenetelmiin määräytyy kulloinkin suunniteltavan tien, kadun tai radan palvelutason mukaan. Suuntaa antavana rajana voidaan pitää paaluhattarakenteen käyttöalueen pohjamaan leikkauslujuuden 20 kPa vähimmäisarvoa. Paaluhattarakennetta ei pitäisi käyttää dynaamisten kuormitusten alueilla, kuten moottori- tai pääteillä, pääkaduilla tai eteenkään radoilla. Paaluhattarakenteiden toimivuutta voidaan kuitenkin teiden ja katujen osalta parantaa esimerkiksi asentamalla lujiteverkko estämään pengermateriaalin valumista paaluhattujen välistä pohjamaahan.

Paalulaattarakenteiden uusin käyttöalue ovat pihat. Tiheään rakennetuilla alueilla on kaavoitus siirtynyt entistä painuvimmille pehmeikköalueille. Huomioiden pihojen painumille annetut uudet määräykset ja asuntojen kasvavat neliökustannukset, on paalulaattarakenteen käyttö entistä useammin perusteltua. Lisäksi matalilla pengerkorkeuksilla muodostuu paalulaattarakenteesta paaluhattarakennetta edullisempi vaihtoehto, sen paremmin hyödyntäessä koko paalun kapasiteetin.

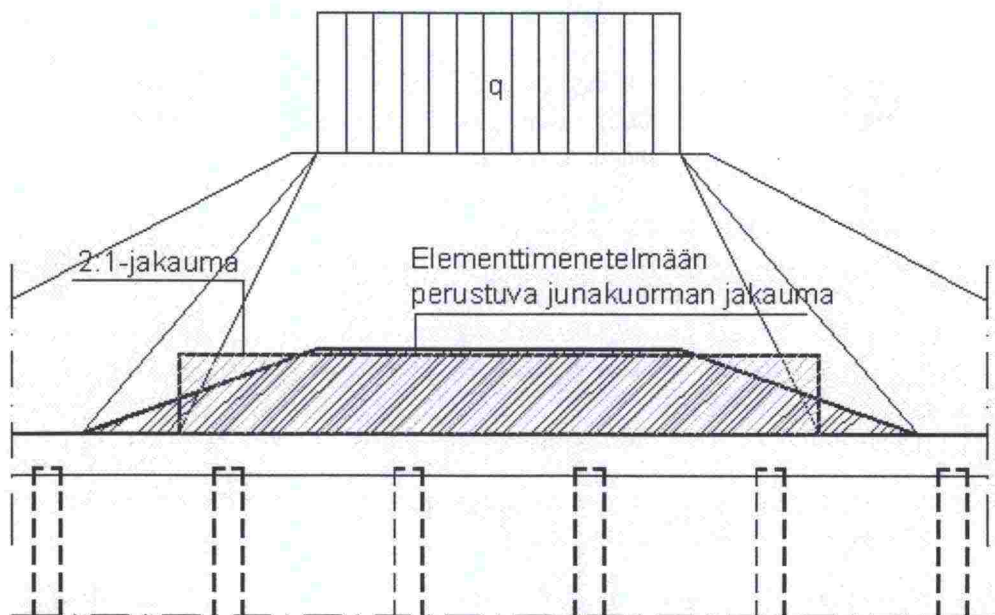
Paalulaattarakenteita käytettäessä on huomioitava myös painumat eri perustusmenetelmien välillä. Paalulaatta pitäisi mahdollisuuksien mukaan päättää joko kantavaan pohjamaahan tai kaivamalla tehtyyn massanvaihtoon. Mikäli paalulaatta liittyy syvästabilointiin, pitäisi syvästabilointipilarit mitoittaa kimmoisina ja rakenne esikuormittaa. Siirtymäläattojen merkitys korostuu erityisesti syvästabilointiin liittyäessä.

Siirtymärakenteiden merkitys korostuu entisestään kunnallistekniikan liittyessä paalulaattaan. Putket ja johdot sietävät varsin huonosti epätasaisen painuman niille aiheuttamia taipumia ja kaltevuuden muutoksia. Erityisesti viettoviemäreiden toimivuus varmistetaan vain pohjasuhteisiin nähden riittävällä siirtymärakenteilla.

## 8.2 Kuormitukset

Vaikka teiden ja ratojen liikenteestä aiheutuvat kuormitukset ovat suuruudeltaan varsin erilaisia, pitäisi niiden merkityksen olla itse suunnitteluperiaatteisiin vaikuttamaton lähtötieto. Tämä tarkoittaa, että kuormitusten jakautuminen penkereessä pitäisi ratkaista samoja periaatteita noudattaen. Koska Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnitteluohjeen mukainen kappaleessa 3.2.1 esitetty penkereessä vaikuttava tasaisen pystykuorma syvyyden funktiona johtaa korkeiden penkereiden osalta ylimitoitukseen ja matalilla penkereillä mahdolliseen alimitoitukseen, pitäisi sen käytöstä luopua. Sen sijaan pitäisi määrittää samassa kappaleessa esitettyjen kuormakaavioiden mukaiset kuormitusjakaumat, esimerkiksi elementtimenetelmää käyttäen. Ratahallintokeskuksen julkaisun: RAMO 3, kappaleessa 3.1.1 esitetty juna-kuorman kuormitusjakauma on mallinnettu juuri elementtimenetelmää käyttäen.

Tielaitoksen julkaisun: Siltojen kuormat, mukainen oletus liikennekuormien 2:1 jakautumasta johtaa myös likimääräiseen ratkaisuun. Jakauma aiheuttaa edellä mainittua junakuorman jakaumaa kapeampialaisen pintakuorman, jolloin mitoituskourmat laatan reuna-alueilla ovat todellista pienempiä. Myös kuormitetun alueen alla, laatan pinnassa vaikuttava pintakuorma on junakuorman jakauman mukaista pystykuormaa pienempi. Kuva 8.1 esittää kuormitusjakaumien eroa.



Kuva 8.1. Elementtimenetelmällä muodostetun junakuorman jakauman ja 2:1 kuormitusjakauman mukaiset pystykuormitukset paalulaatan pinnassa.



Junakuorman jakaumaa elementtimenetelmällä mallinnettuna on tarkemmin käsitelty kappaleessa 3.1.1.

Koska paalulaatat nykyisin suunnitellaan erilaisia tietokoneohjelmia käyttäen, on todellisen, tasaisesta pystykuormasta poikkeavan kuormituksen mallintaminen entistä helpompaa.

Katujen ja pihojen paalulaatat pitäisi mitoittaa liikennekuormaa (Lk1) käyttäen. Vaikka kadut ja pihat olisivat painorajoitettuja, on mahdollista, että painorajoituksia raskaammat ajoneuvot niillä liikkuvat. Pihojen tai alempiluokkaisten katujen osalta ei sysäyslisää tosin tarvitse huomioida. Pääkatujen osalta paalulaatat pitäisi lisäksi mitoittaa erikoiskuormalle (Ek1).

### 8.3 Paaluperustuksen suunnittelu

Käytettävän paalutyypin valinnassa pitää huomioida kohteen pohjasuhteet. Teräsbetonisia lyöntipaaluja voidaan käyttää kohteissa, jossa pehmeikön pintakerros on riittävän luja ja paksu tukemaan paaluja siten, ettei raskaan lyöntipaalutuskoneen liikkuminen paalutuskentällä aiheuta paalujen yläpäiden siirtymiä tai rikkoutumisia. Kohteen maakerrosten on lisäksi oltava helposti läpäistäviä, sillä kivet tai lohkarieet rikkovat helposti hoikan teräsbetonipaalun. Paalun tukeutumistason maakerrosten on oltava tiiviitä ja riittävän paksuja paalun riittävän sivutuennan turvaamiseksi. Jos kalliokärjetön teräsbetonipaalu tukeutuu kallioon ja jos kantavat maakerrokset kallionpinnalla ovat ohuita, pitää kallionpinnan olla lähes tasainen, ettei paalun kärki liukuisi. Kallioon tukeutuvat lyöntipaalut suositellaan varustettavaksi kallio-kärjillä, jotka myös suojaavat paalujen kärkiä ja keskistävät kärkien kuormituksen.

Pieniläpimittaisia teräsputkipaaluja, kuten RR-paaluja, suositellaan käytettäväksi, kun:

- teräsbetonipaluihin kohdistuu rikkoutumisvaara maakerrosten kivityyden, vaikeasti läpäistävän pintakerroksen, lohkarieisen pohjakerroksen tai vinon kalliopinnan paaluun taivutuksen takia
- pyritään vähentämään paalun maata syrjäyttävää vaikutusta
- pyritään vähentämään paalutuksen aiheuttamaa tärinää
- maapohjan kantokyky ei ole riittävä raskaille teräsbetonipaalujen lyöntiin tarkoitetuille paalutuskoneille
- paalun teräsbetonipaalua nopeampi siirto, varastointi ja käsittely ovat kireän rakennusaikataulun takia perusteltuja

Vaikka pieniläpimittaiset teräsputkipaalut kestävät vinon kalliopinnan paalujen alapäähän aiheuttamaa taivutusta teräsbetonipaaluja paremmin, suositellaan paalun tukeutuessa jyrkkään kallionpintaan tai muutoin erityisen vaikeissa paalutusolosuhteissa käytettäväksi porapaalua.

Teräsbetonipaalujen vähimmäiskooksi paalulaattarakenteessa suositellaan 300\*300 mm<sup>2</sup>. Paalun pystyyn nosto ja lyönti aiheuttavat hoikalle 250\*250 mm<sup>2</sup> teräsbetonipaalulle voimakasta taivutusta, puristusta ja vetoa, jolloin paalun 100 vuoden käyttöiästä on sallitun halkeamaleveyden ylittyessä



mahdoton varmistua. Perustettaessa paalulaatta RR-paaluilla, suositellaan paalun vähimmäiskooksi RR115/8.

Paalulaatta pitäisi perustaa tukipaaluilla. Perustettaessa rakenne pystysuunnassa yksittäisinä paaluina toimiville kitkapaaluille on paalujen keskinäisiä painumaeroja pohjasuhteiden nopeasti muuttuessa vaikea arvioida. Paalujen painumaerot aiheuttavat paalulaattaan halkeamia ja rakenteen käyttöikä pienenee.

Paalulaattarakenteen paalujen sallittua painumaeroa voidaan arvioida otaksumalla, että laatan taipuman tälle aiheuttamat jännitykset pysyvät suunnitelmien mukaisten jännitysten suuruisina. Tällöin paalujen painumaero saisi olla noin 2...5 mm paaluvälistä riippuen, jotta laatan taivutus ei aiheuta tälle sallittua halkeamaleveyttä suurempia halkeamia. Koska eripituisten paalujen kokoonpuristumat saattavat aiheuttaa edellä mainitun painumaeron, pitäisi paalut lyödä tukipaaluina kantavaan kerrokseen, missä painumia ei enää oleteta tapahtuvan. Käytettäessä II-luokan 300\*300 mm<sup>2</sup> tukipaalua ja betonin pitkäaikaisen kimmomoduulin arvoa  $E_{cc}=15800$  MPa, noin 2 mm suuruisen painumaero aiheutuu paalun varren kokoonpuristumasta paalujen pituuseron ollessa 4,5 metriä.

Lähtökohtaisesti paalulaattarakenteen paaluperustuksen muoto on kappaleessa 5.7.2 kuvassa 5.7 a) esitetty vinopaaluperustus. Paalulaatan reunojen vinopaaluilla otetaan vastaan vaakasuoran maapaineen sekä vaakasuorien ulkoisten kuormien vaikutus paalulaattaan. Malli on mitoituksellisesti pystypaaluperustusta helpompi, sillä maan paaluja tukevaa vaikutusta ei yleensä huomioida. Kun taas varaudutaan paalulaattarakenteen myöhempään leventämiseen tai paalut halutaan mitoittaa taloudellisemmin, valitaan pystypaaluperustus. Tällöin on kuitenkin varmistuttava maan riittävästä sivutuennasta paaluille.

## 8.4 Paalulaatan suunnittelu

### 8.4.1 Geotekninen suunnittelu

Paalulaattarakenne on suunniteltava siten, että alueellinen vakavuus on  $F \geq 1,8$  sekä ennen paalutusta että valmiinkin rakenteen osalta. Paalutuksen aikana alueellinen vakavuus voi olla  $< 1,8$ , mutta tällöin on varmistettava, ettei paalutusalueella tapahdu plastisia muodonmuutoksia.

Penkereen poikkileikkauksen vakavuus pitää tarkastaa kappaleen 4.2.1 mukaisesti penkereen liikenteelle varatun osan sekä paalulaatan ulkopuolisen osan pengerosan suhteen. Penkereen liikenteelle varatun osan kokonaisvarmuus 1,5 tasoliukupinnalla katsotaan riittäväksi. Tämä määrittää myös paalulaatan leveyden, ellei penkereen luiskaa jyrkennetä lujitteiden tai muiden tuentaratkaisujen avulla. Penkereen poikkileikkauksen, paalulaatan ulkopuolisen pengerosan varmuus on puolestaan oltava  $F \geq 1,8$ . Mikäli varmuutta ei saavuteta, voidaan laatan reunalla käyttää lujitetta.

Valualustan painumaa betonin sitoutumisen aikana voidaan arvioida kohteesta tehtyjen ödometrikokeiden perusteella. Painuma ei saa ylittää 5 mm. Erittäin pehmeiden savien sekä turve- tai liejupehmeikköjen osalta tämä saavutetaan vain ohutta alustäyttöä käyttämällä. Vaihtoehtoisesti voidaan



valu suorittaa talvella, jolloin maapohjan kantokyky on huomattavasti parempi.

Kasvattamalla alustäyttöä ja antamalla sen painua, voidaan painuman nopeutta pienentää, mutta tämä johtaa vain paaluja kuormittavaan negatiiviseen vaippahankaukseen. Myöskään valupohjan lujittaminen ohutta raudoittamatonta betonilaattaa käyttäen ei juuri paranna tilannetta, sillä tämä todennäköisesti murtuu varsinaisen valun alla.

#### **8.4.2 Rakenteellinen suunnittelu**

Rakenteellisen mitoituksen osalta nykyiset suunnitteluperiaatteet toimivat hyvin. Niiltä osin, kun suunnitelmat ovat noudattaneet voimassa olleita määräyksiä ja rakennustyö puolestaan kohteen suunnitelmia, ei vaurioita esimerkkikohteiden osalta havaittu.

Paalulaattojen rakenteellinen mitoitus poikkeaa teiden ja ratojen osalta murtorajatilán osavarmuuskertoimien suhteen. Teiden osalta murtorajatilán osavarmuuskertoimet ovat liikennekuormalle (Lk1) 1,8 ja raskaalle erikoiskuormalle (Ek1) 1,4. Ratojen osalta vastaava murtorajatilán osavarmuuskerroin junakuormalle on 1,6. Mikäli teiden liikennekuormitukset määritettäisiin tarkemmin, kappaleessa 8.2 esitetyin periaattein, voitaisiin harkita myös murtorajatilán osavarmuuskertoimien yhtenäistämistä.

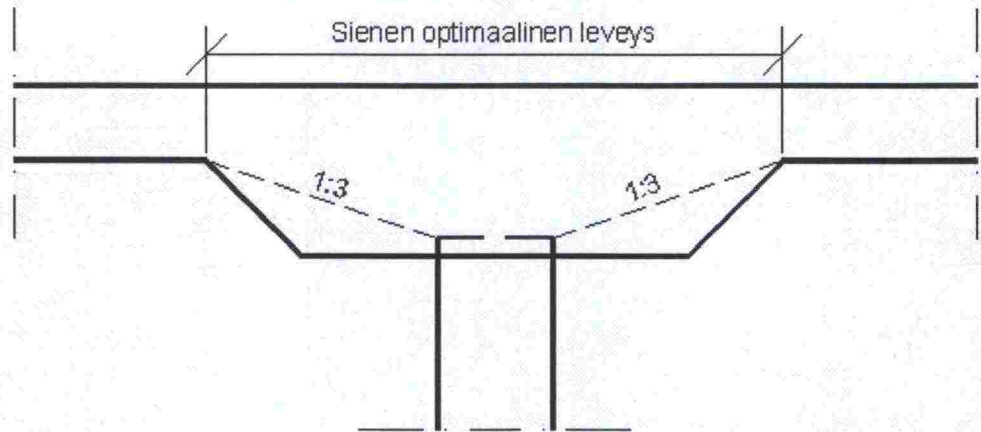
Paalulaatan rakenteellinen mitoitus sekä läpileikkautumisen että taivutuksen suhteen pitää mitoittaa Suomen Rakentamismääräyskokoelman betonirakenteita koskevien määräysten mukaan. Myös laatan halkeilu tulee mitoittaa RakMk osaa B4 noudattaen. Laatan mitoituksessa käytetty, sallittu halkeamaleveys voitaneen sen sijaan määrittää, kuten nykyisinkin, ennen vuotta 2005 voimassa olleiden betonirakenteita koskevien määräysten mukaan. Näin sallittu halkeamaleveys lyhytaikaisille kuormille olisi 0,3 mm ja pitkäaikaisille kuormille 0,2 mm. Nämä raja-arvot voidaan vielä laskennallisesti kertoa luvulla  $\frac{c_{tod}}{c_{min}}$ , kuitenkin enintään 1,5. Kerroin  $c_{tod}$  on laskennassa käytetty

betonipeitteen vähimmäisarvo (nimellisarvo-sallittu mittapoikkeama) ja  $c_{min}$  Paalulaattojen ja paaluhattarakenteiden suunnitteluohje mukaisesti 35 mm.

Vuonna 2005 voimaan astuneet (RakMk) betonirakenteita koskevat määräykset ovat halkeilun osalta edellä esitettyjä sallittuja halkeamaleveyksiä huomattavasti kireämmät. Kuitenkin, kun samalla paalujen osalta hyväksytään uudessa Lyöntipaalutusohjeessa (LPO-2005) vanhentuneiden määräysten mukaiset sallitut halkeamaleveydet, ei samaan rakenteeseen kuuluvan laatan osalta ole perusteltua tiukentaa määräyksiä.

Betonipeitteen vähimmäispaksuuden pitäisi maata vasten valettaessa olla 50 mm. Tällöin raudoituksen sijaintipoikkeama saisi olla enintään 15 mm, jotta Paalulaattojen ja paaluhattarakenteiden suunnitteluohjeen mukainen betonipeitteen 35 mm vähimmäisarvo täyttyisi. Tämä vähimmäisvaatimus koskee betonirakenteiden vanhentuneiden määräysten mukaan vaikeita ympäristöolosuhteita.

Sienilaatoissa sienien mitat kannattaa valita rakenteen kapasiteetin optimoivalla tavalla. Koska (RakMk) betonirakenteita koskevien määräysten mukaan pääasiassa taivutetuissa rakenteissa saa rakenteen tehollisen poikki-leikkauksen olettaa muuttuvan enintään suhteessa 1:3, valitaan sienien leveys siten, että paalun reunasta suhteessa 1:3 nouseva viiva sivuaa sienien viisteen ja ohuemman laattaosan yhtymäkohtaa. Asiaa havainnollistetaan kuvassa 8.2.



Kuva 8.2. Periaate sienien mittojen määräytymiselle.

Tässä kappaleessa sekä kappaleessa 4.3 esitettyjen paalulaatan rakenteellisten mitoitusohjeiden perusteella voidaan ehdottaa seuraavia taulukoiden 8.1, 8.2, 8.3 ja 8.4 mukaisia sienilaattojen vähimmäispaksuuksia. Liikenne kuorman (Lk1) ja erikoiskuorman (Ek1) oletetaan jakautuvan ohjeen: Siltojen kuormat, mukaan. Tarkasteluiden laatat ovat kahteen tasoon raudoitettuja. Betonina on käytetty K40-1 ja teräksinä A500HW. Tarkasteluissa on lisäksi huomioitu paalujen 100 mm sallittu sijaintipoikkeama sekä alapinnan raudoituksen -0...+15 mm ja yläpinnan raudoituksen -15...+0 mm sallitut sijainti poikkeamat. Betonipeitteen vähimmäisarvona on pidetty 60 mm. Paalut tulevat 50 mm laatan sisään.



*Taulukko 8.1. Sienilaatan vähimmäispaksuudet tierakenteissa pengerkorkeuksilla 1,5...10 metriä, teräsbetonipaalu paalutusluokassa II.*

Pengerkorkeus (m)	Liikennekuorman ominaisarvo (kN/m <sup>2</sup> )	Paaluväli (m)	Sieniosan paksuus (mm)	Ohuemman laattaosan paksuus (mm)
1,5	64,1 <sup>(1)</sup>	2,43	410	210
2,0	45,5 <sup>(1)</sup>	2,54	400	210
3,0	24,8 <sup>(1)</sup>	2,54	390	210
4,0	17,1 <sup>(1)</sup>	2,40	390	210
5,0	12,5 <sup>(1)</sup>	2,24	390	210
6,0	1,35*g <sup>(2)</sup>	2,11	400	210
7,0	1,35*g <sup>(2)</sup>	1,98	400	210
8,0	1,35*g <sup>(2)</sup>	1,88	400	210
9,0	1,35*g <sup>(2)</sup>	1,79	400	210
10,0	1,35*g <sup>(2)</sup>	1,71	400	210

*Taulukko 8.2. Sienilaatan vähimmäispaksuudet tierakenteissa pengerkorkeuksilla 1,5...10 metriä, teräsbetonipaalu paalutusluokassa 1b.*

Pengerkorkeus (m)	Liikennekuorman ominaisarvo (kN/m <sup>2</sup> )	Paaluväli (m)	Sieniosan paksuus (mm)	Ohuemman laattaosan paksuus (mm)
1,5	64,1 <sup>(1)</sup>	2,76	470	220
2,0	45,5 <sup>(1)</sup>	2,88	460	220
3,0	24,8 <sup>(1)</sup>	2,89	450	220
4,0	17,1 <sup>(1)</sup>	2,72	450	220
5,0	12,5 <sup>(1)</sup>	2,55	450	220
6,0	1,35*g <sup>(2)</sup>	2,39	450	220
7,0	1,35*g <sup>(2)</sup>	2,25	460	220
8,0	1,35*g <sup>(2)</sup>	2,13	460	220
9,0	1,35*g <sup>(2)</sup>	2,03	460	220
10,0	1,35*g <sup>(2)</sup>	1,93	460	220

- (1) Raskas erikoiskuorma (Ek1) antaa määrävän vaikutuksen rakennetta mitoitettaessa. Kuorma sisältää sysäyslisän.
- (2) 1,35 kertainen pysyvä kuorma antaa määrävän vaikutuksen murto-rajatilassa.

*Taulukko 8.3. Sienilaatan vähimmäispaksuudet ratarakenteissa pengerkorkeuksilla 1,5...10 metriä, teräsbetonipaalut paalutusluokassa II.*

Penger- korkeus Kv - (m)	Juna- kuorman (35 t akseli- paino) omi- nais-arvo (kN/m <sup>2</sup> )	Paaluväli (m)	Sieniosan paksuus (mm)	Ohuemman laattaosan paksuus (mm)
1,5	64,0	2,47	430	210
2,0	51,6	2,46	420	210
3,0	38,3	2,38	410	210
4,0	29,5	2,27	400	210
5,0	23,4	2,15	400	210
6,0	19,5	2,04	400	210
7,0	17,5	1,92	390	210
8,0	16,0	1,83	390	210
9,0	1,35*g <sup>(2)</sup>	1,74	390	210
10,0	1,35*g <sup>(2)</sup>	1,67	390	210

*Taulukko 8.4. Sienilaatan vähimmäispaksuudet ratarakenteissa pengerkorkeuksilla 1,5...10 metriä, teräsbetonipaalut paalutusluokassa 1b.*

Penger- korkeus Kv - (m)	Juna- kuorman (35 t akseli- paino) omi- naisarvo (kN/m <sup>2</sup> )	Paaluväli (m)	Sieniosan paksuus (mm)	Ohuemman laattaosan paksuus (mm)
1,5	64,0	2,80	490	220
2,0	51,6	2,79	480	220
3,0	38,3	2,70	470	220
4,0	29,5	2,58	460	220
5,0	23,4	2,44	450	220
6,0	19,5	2,31	450	220
7,0	17,5	2,18	450	220
8,0	16,0	2,07	440	220
9,0	1,35*g <sup>(2)</sup>	1,98	450	220
10,0	1,35*g <sup>(2)</sup>	1,89	450	220

(2) 1,35 kertainen pysyvä kuorma antaa määräävän vaikutuksen murto-  
rajatilassa.

Kuormien osavarmuuskertoimina tarkasteluissa on käytetty kappaleessa 4.3  
esitettyjä kertoimia.

Tasapaksuille laatoille ehdotetaan seuraavia, taulukoiden 8.5 ja 8.6 mukaisia  
vähimmäispaksuuksia. Tarkastelut on suoritettu edellä esitettyjä, sienilaatto-  
jen osalta mainittuja periaatteita noudattaen. Raudoituksen suhteellisenä  
pinta-alana on käytetty (RakMk) betonirakenteita koskevien määräysten sal-



limaa maksimiarvoa eli  $\rho=0,008$ . Tällöin paalun läpileikkautuminen muodostuu määrääväksi laatan vähimmäispaksuutta laskettaessa.

*Taulukko 8.5. Tasapaksujen laattojen vähimmäispaksuudet tierakenteissa pengerkorkeuksilla 1,5...10 metriä.*

Pengerkorkeus (m)	Liikennekuorman ominaisarvo (kN/m <sup>2</sup> )	Paaluväli (m)		Vähimmäispaksuus (mm)	
		Tb-paalut paalutusluokka II	Tb-paalut paalutusluokka 1b	Tb-paalut paalutusluokka II	Tb-paalut paalutusluokka 1b
1,5	64,1 <sup>(1)</sup>	2,43	2,76	410	480
2,0	45,5 <sup>(1)</sup>	2,54	2,88	410	470
3,0	24,8 <sup>(1)</sup>	2,54	2,89	400	460
4,0	17,1 <sup>(1)</sup>	2,40	2,72	400	460
5,0	12,5 <sup>(1)</sup>	2,24	2,55	400	460
6,0	1,35*g <sup>(2)</sup>	2,11	2,39	400	460
7,0	1,35*g <sup>(2)</sup>	1,98	2,25	410	460
8,0	1,35*g <sup>(2)</sup>	1,88	2,13	410	460
9,0	1,35*g <sup>(2)</sup>	1,79	2,03	410	460
10,0	1,35*g <sup>(2)</sup>	1,71	1,93	410	460

*Taulukko 8.6. Tasapaksujen laattojen vähimmäispaksuudet ratarakenteissa pengerkorkeuksilla 1,5...10 metriä.*

Pengerkorkeus (m)	Juna-kuorman (35 t akseli-paino) ominaisarvo (kN/m <sup>2</sup> )	Paaluväli (m)		Vähimmäispaksuus (mm)	
		Tb-paalut paalutusluokka II	Tb-paalut paalutusluokka 1b	Tb-paalut paalutusluokka II	Tb-paalut paalutusluokka 1b
1,5	64,0	2,47	2,80	440	510
2,0	51,6	2,46	2,79	430	490
3,0	38,3	2,38	2,70	420	480
4,0	29,5	2,27	2,58	410	470
5,0	23,4	2,15	2,44	410	460
6,0	19,5	2,04	2,31	400	460
7,0	17,5	1,92	2,18	400	450
8,0	16,0	1,83	2,07	400	450
9,0	1,35*g <sup>(2)</sup>	1,74	1,98	400	450
10,0	1,35*g <sup>(2)</sup>	1,67	1,89	400	450

- (1) Raskas erikoiskuorma (Ek1) antaa määrävän vaikutuksen rakennetta mitoitettaessa. Kuorma sisältää sysäyksiä.
- (2) 1,35 kertainen pysyvä kuorma antaa määrävän vaikutuksen murto-rajatilassa.

## 9. JOHTOPÄÄTÖKSET

### 9.1 Paalulaattarakenne

Paalulaattarakenne, jonka käyttöikä on 100 vuotta, muodostuu paaluista sekä näiden kannattamasta paalulaatasta. Se pitää suunnitella siten, että koko rakenteen toiminta niin geoteknisesti kuin rakenteellisesti on turvattu. Rakenteen pitää kestää sille sallittujen mittapoikkeamien aiheuttamat kuormitusten ja rasitusten muutokset määrätyn varmuustason puitteissa.

Paalutyypin valinta perustuu kohteen pohjasuhteisiin nähden kattaviin pohjatutkimuksiin. Paalutyypin valintaan vaikuttavat sekä läpäistävien maakerrosten että paalun tukeutumistason maakerroksen ominaisuudet. Lisäksi on paalutyön kannalta huomioitava pohjamaan pintakerroksen ominaisuudet.

Paalulaattarakenteen paalut eivät muodosta paaluryhmää, sillä ne toimivat pystysuunnassa paalulaatan hoikan rakenteen vuoksi yksittäisinä paaluina. Tämän vuoksi paalulaattarakenne on perustettava tukipaaluin, sillä kitkapaaluna toimivien paalujen painumaerot voivat pohjasuhteiden muuttuessa kasvaa paalulaatan rakenteellisen kestävyyskannalta liian suuriksi. Vaaka-suunnassa paalujen voidaan olettaa toimivan ryhmänä.

Paalulaattarakenne on suunniteltava siten, että paalujen geotekninen kantavuus on riittävä ja että ne rakenteellisesti kestävät niille tulevat kuormat. Koska paalulaattarakenteissa paalutyypinä eniten käytetty teräsbetonipaalu kestää varsin huonosti paalun taivutusta, pitää erityisesti paalujen sivukuormitusta sekä alustäytön painuman vinopaaluille aiheuttamaa taivutusta ja negatiivista vaippahankausta välttää. Myös riittämätön alueellinen vakavuus aiheuttaa paalujen taivutusta. Teräsbetonipaalut on sekä geoteknisesti että rakenteellisesti mitoitettava uuden Lyöntipaalutusohjeen (LPO-2005) mukaan.

Paalulaatta on rakenteellisesti suunniteltava siten, että se täyttää Suomen rakentamismääräyskokoelman betonirakenteita koskevat määräykset läpileikkautumisen ja taivutuksen suhteen. Halkeilun osalta paalulaatat pitää myös mitoitaa (RakMk) periaatteita noudattaen, mutta sallittuna halkeama-levytenä voitaneen pitää kappaleessa 8.4.2 esitettyjä arvoja. Paalulaattaan ei vallitsevien ympäristöolosuhteiden sekä vähäisen penkereestä suotautuvan suolan lisäksi katsota kohdistuvan ulkopuolisia ympäristövaikutuksia.

Paalulaatan pituus valitaan huomioiden painumat eri perustusmenetelmien välillä. Perustusmenetelmän muutos ei saa aiheuttaa tien, kadun tai radan palvelutasoon nähden liian suuria painumia tai kaltevuuden muutoksia. Kun kyse on alikulusta, paalulaatan vähimmäispituuden määrittää osaltaan alikulun luiskien vakavuus.

Paalulaatan leveys valitaan siten, että paalulaatan yläpuolisen penkereen luiskan vakavuus on riittävä. Luiskatäyttöä suunniteltaessa on puolestaan huomioitava paalulaatan ulkopuolisen pohjamaan ominaisuudet.

Koska paalulaattarakenteiden vauriot, kuten esimerkkitapauksissakin, johtuvat usein rakennustyön laiminlyönnestä pitäisi rakennustyön laatuun kiinnittää entistä enemmän huomiota. Esimerkiksi suunnitelmista poikkeavat läji-



tykset, teräsbetonipaalujen huolimaton varastointi ja lyönti tai työkoneiden liikkuminen paalulaatan liian ohuen suojakerroksen päällä ovat rakenteen kannalta epäsuotuisia, mutta riittävällä valvonnalla hoidettavia asioita.

## 9.2 Käyttöalueiden ongelmallisuus

Paalulaattarakenne on teiden, katujen, ratojen ja pihojen pehmeikkökohteissa käytettävä perustusmenetelmä. Sitä käytetään, kun vaihtoehtoisilla perustusmenetelmillä ei saavuteta teknisesti toimivaa rakennetta tai kun niiden rakentaminen tulee liian kalliiksi. Paalulaattarakennetta voidaan käyttää myös, mikäli vaihtoehtoista perustusmenetelmää kalliimmat rakennuskustannukset ovat elinkaarikustannusten kannalta perusteltuja.

Paalulaattarakenteen käyttöalue on ristiriitainen. Paalutustyö ja paalulaatan valualustan painumakriteerit asettavat kohteen pohjasuhteille vaatimuksia, joita eteenkään turve- tai liejupitoiset pehmeiköt eivät usein täytä. Tällaisten pehmeikköjen osalta on suunnitteluohjeiden määräykset täyttävää rakennetta ilman erityistoimenpiteitä usein mahdoton rakentaa.

Paaluperustuksen oikealla suunnittelulla voidaan kuitenkin paalutustyö tehdä pohjasuhteiltaan erittäin pehmeissäkin kohteissa. Paalutustyön tai työkoneiden liikkumisen aiheuttamia paalujen yläpäiden siirtymiä, pohjamaan huokospaineen kasvua tai ympäristöön leviävää tärinää voidaan vähentää esimerkiksi:

- oikean paalutyyppin tai -koon valinnalla
- paalutusjärjestyksellä
- paalutustyön ajankohdan valinnalla
- esireikää käyttämällä
- paaluun liitettäviä pystyjoja käyttämällä

Hienorakeisten tai eloperäisten maakerrosten kokoonpuristumisesta aiheutuvaa paalulaatan valualustan painumaa betonin sitoutumisen aikana on sen sijaan vaikea rajoittaa. Todelliset keinot painuman rajoittamiseksi lienevät paalulaatan korkeusaseman valinta siten, että paalulaatan alustäyttö jää mahdollisimman ohueksi tai ettei pohjamaan kuivakuorta kaiveta pois. Paalulaatan valu voidaan myös tehdä talvella, jolloin pohjamaa on jäässä ja kantaa siten paremmin. Tehtaässä laatan valu talvella, on kuitenkin huolehdittava laatan riittävästä suojaamisesta ja lämmityksestä.

## 9.3 Yhtäläisten suunnitteluperiaatteiden edut

Vaikka paalulaattarakenteiden historia Suomessa on varsin pitkä, eivät niiden suunnitteluperiaatteet ole vielä täysin vakiutuneet. Koska suunnittelu käsittää useiden sekä geoteknisten että rakenteellisten osatekijöiden yhteensovittamista, pitäisi paalulaattarakenteiden suunnitteluperiaatteet teiden, katujen ja ratojen osalta yhtenäistää siten, että paalulaattarakenteen toimivuus on turvattu ja sen toimintatapa oikein ymmärretty. Näin hankekohtaisesti voitaisiin selkeämmin viitata yhteisiin suunnitteluohjeisiin. Myös vaara rakennuskustannuksiltaan edullisemmista, mutta rakenteen elinkaarta lyhentävistä suunnitelmista pienenesi.

Vaikka tämä tutkimus ei ole paalulaattarakenteiden yhteinen suunnitteluohje, pyritään siinä ehdotuksiin suunnitteluperiaatteiden yhtenäistämiseksi. Lisäksi tutkimus tarjoaa eri suunnitteluohjeisiin ja esimerkkikohteisiin perustuvaa tietoa paalulaattarakenteiden nykyisistä mitoitusperiaatteista.



## 10. KIRJALLISUUSLUETTELO

- /1/ Betoniyhdistys, Betoninormit (BY 50), 2004.
- /2/ Hartikainen, J., Mantere, P., Teräsputkipaalut rautatiesilloissa, Oy VR-Rata Ab, Suunnitteluosasto, 1995.
- /3/ Mara, J., Puupaaluilla perustettujen tierakenteiden vauriot ja korjausmenetelmät, Diplomityö, Tampere 2000.
- /4/ Nikkinen, J., Syvästabiloitujen pilarien ja maan yhteistoiminta, Diplomityö, Tampere 2000.
- /5/ Ratahallintokeskus, Oikorata Kerava – Lahti, Paalulaattojen suunnittelu- ja rakentamisohje, 2003.
- /6/ Ratahallintokeskus, Ratatekniset määräykset ja ohjeet (RAMO), Osa 3, Radan rakenne, Helsinki 2002.
- /7/ Ratahallintokeskus, Rautatien maarakennustöiden yleinen työselitys ja laatuvaatimukset (RMYTL), Osa 3, Perustamis- ja vahvistamistyöt, Helsinki 1999.
- /8/ Ratahallintokeskus, Rautatiesiltojen suunnitteluohje, Osa 2, Rautatiesiltojen kuormat, 2002.
- /9/ Rautaruukki, RR-paalutusohjekirja, 2002.
- /10/ Saarelainen, S., Tierakenteen routamitoitus, VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Espoo 2001.
- /11/ Suomen kuntatekniikan yhdistys, Kadun suunnittelun ja -rakentamisen tekniset ohjeet, Katu 2002
- /12/ Suomen Rakennusinsinöörien Liitto, Lyöntipaalutusohje (LPO-2005)
- /13/ Suomen Rakennusinsinöörien Liitto, Pohjarakennusohjeet, RIL 121-2004.
- /14/ Suomen Rakennusinsinöörien Liitto, Rakenteiden kuormitusohjeet, RIL 144-2002.
- /15/ Suomen Rakennusinsinöörien Liitto, Suurpaalutusohje 2001 (SPO-2001), RIL 212-2001.
- /16/ Suomen Rakentamismääräyskokoelma (RakMk), Osa B4, Betonirakenteet, 2005.
- /17/ Talja, A., Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksesta, VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Espoo 2005.
- /18/ Tiehallinto, Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnitteluohje, TIEH 2100007-01, Helsinki 2001.
- /19/ Tiehallinto, Porapaalutusohje, TIEH 2000002-01, Helsinki 2001.
- /20/ Tiehallinto, Syvästabiloinnin suunnitteluohje, TIEH 2100008-v-04, Helsinki 2004.
- /21/ Tiehallinto, Teiden pohjarakenteiden suunnitteluperusteet, TIEH 2100002-01, Helsinki 2001.
- /22/ Tielaitos, Geotekniikan informaatiojulkaisuja, Massanvaihto, TIEL 3200127, Helsinki 1993.
- /23/ Tielaitos, Siltojen kuormat, TIEL 2172072-99, Helsinki 1999.
- /24/ Tielaitos, Teräsputkipaalut, TIEL 2173448-99, Helsinki 1999.
- /25/ Tyynelä, P., Määrämittaisen syvästabiloinnin mitoitus, Diplomityö, Tampere 2000.
- /26/ Vuola, P., Dynamic Compaction of Saturated Sand, Lisenssiaattitutkimus, Tampere 1996.

## **11. LIITTEET**

- Liite 1. Diplomityön ohjausryhmän jäsenten ja asiantuntijoiden näkemykset liittyen paalulaattarakenteisiin, 4 s.
- Liite 2. Kappaleen: Esimerkkitapaukset, kuvat, 6 s.



LIITE 1

Historia ja nykytila	Pengerpaalutus tehtiin aiemmin pääasiassa paaluhatturakenteina.	Pentti Salo Tiehallinto
	Edelleen on paljon puupaaluilla perustettuja käytössä olevia rakenteita. Näistä suurin osa on paaluhatturakenteita.	Pentti Salo Tiehallinto
	Paaluhatturakenteiden osalta on ilmentynyt jonkin verran vaurioita.	Pentti Salo Tiehallinto
	Tierakenteissa paaluhatturakenteiden käyttöä edisti "byrokratia". Paaluhatturakenteita käytettäessä ei ole tarvittu rakennesuunnittelijaa.	Petter Sandin Uudenmaan tiepiiri
	Ensimmäiset paalulaatat noin 35 vuotta sitten mitoitettiin siltoina. Sitten kehitys on monessa tapauksessa johtanut riskialttiisiin ratkaisuihin joissa laatta ei toimi rakenteellisesti laattana. Ilmeisesti ensimmäinen suuri kohde, jossa paalulaattojen geotekninen ja rakenteellinen mitoitus on riittävän hallitusti tehty, on Oikorata.	Jorma Hartikainen Tampereen teknillinen yliopisto
	VR teki ensimmäiset pengerpaalutuskohteet 1960-luvun loppupuolella. Paalumateriaali oli tuolloin puuta. Ensimmäisissä kohteissa penger perustettiin suoraan paalujen varaan. Näitä rakenteita on korjattu myöhemmin.	Jouko Suomalainen Oy VR-Rata Ab
	Paaluhattujen käyttöönotto vilkastutti pengerpaalutuksen käyttöä.	Jouko Suomalainen Oy VR-Rata Ab
	Suuri osa paalutetuista rakenteista on paaluhatturakenteita, mutta löytyy myös paljon paalulaattarakenteita.	Osmo Korhonen Helsingin kaupunki
	VTT julkaisi teorian paaluhatturakenteen holvautumisesta 80-luvulla. Teorian toimivuuteen uskottiin laajalti. Ajan kuluessa kokemukset osoittivat kuitenkin teorian toimimattomuuden. Penger materiaalin holvaantuminen purkaantuu pengermateriaalin valuessa paaluhattujen välistä.	Jouko Suomalainen Oy VR-Rata Ab
	Alkuaikoina paalulaattarakenteiden suunnittelussa oli melko "villejä" ideoita. Mm. paaluhattujen varaan valettuja ohuita keskiraudoitettuja laattoja käytettiin.	Jouko Suomalainen Oy VR-Rata Ab
	VR:n kohteissa paalulaattarakenteiden käyttö tuli ohjeelliseksi vuonna 1999 (RMYTL).	Jouko Suomalainen Oy VR-Rata Ab
	Teoria maan "holvautumisesta" on väärä, eikä holvaantuminen toimi edes staattisilla kuormilla puhumattakaan syklisistä tai jopa dynaamisista kuormituksista, joita liikenne aiheuttaa.	Jorma Hartikainen Tampereen teknillinen yliopisto
	Uudessa suunnitteluohjeessa: Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnitteluohje, paaluhatturakenteiden käyttöaluetta on kavennettu pohjamaan leikkauslujuuden vaatimusta nostamalla.	Pentti Salo Tiehallinto
	Paalulaattakohteista voi puuttua suunnitelmia ja erityisesti toteutumapiirustuksia.	Petter Sandin Uudenmaan tiepiiri
	Tilanpuute ajaa kaavoituksen pohjasuhteiltaan entistä huonommille alueille. Tällöin rakennukset, kadut, kunnallistekniikka ja jopa piha-alueet on perustettava paalutuksella tai pohjanvahvistuksilla.	Osmo Korhonen Helsingin kaupunki
Kuormitukset	Usein tällainen esirakentaminen on kaupungin kannalta riittävän taloudellista jopa rakenteiden perustamiseen paalulaatoilla.	Osmo Korhonen Helsingin kaupunki
	Kuormituksen laatu ja jakauma on otettava huomioon riittävän oikein, muutoin on turha puhua hallitusta suunnittelusta.	Jorma Hartikainen Tampereen teknillinen yliopisto
	Suomen teillä liikkuu aina vaan suurempia erikoiskuljetuksia, jopa 400 tonnin muuntajakuljetuksia, ja jatkossa on syytä kiinnittää huomiota paitsi siltojen niin myös paalulaattojen kantokykyyn.	Matti Piispanen Tiehallinto
Paalulaatan rakenne-suunnittelu	Laattarakennetta mitoitettaessa liikennekuormista huomioidaan vain pystykuorma.	Pentti Salo Tiehallinto
	Paalulaattarakenteet ovat pääosin sienilaattoja. Näistä suurin osa on yhteen tasoon raudoitettuja ja lisäksi sienien kohdalla on leikkausraudoitus. Mitoituksessa määräävänä tekijänä on usein paalulaatan suojaeroksen päällä liikkuva työkone.	Petter Sandin Uudenmaan tiepiiri



	VR:n julkaisu: Pengerlaatat, 1992 sisältää tyyppipiirroksia paalulaatoista. Julkaisu sisältää myös raudituspiirustukset sekä rakenteen mitoituksen eri pengerkorkeuksilla. Mukana oli tuolloin vielä sienilaattamainen ohut keskiraudoitettu laatta.	Jouko Suomalainen Oy VR-Rata Ab
	Sittemmin VR on julkaissut uusia tyyppiohjeita liittyen eri rakennuskohteisiin. Nykyinen hankkeeseen Oikorata Kerava-Lahti liittyvä ohjeistus sisältää varsin kattavan valikoiman paalulaattojen mitoitus- ja raudituspiirustuksia. Ns. ohut keskiraudoitettu laatta ei enää kuulu ohjeisiin.	Jouko Suomalainen Oy VR-Rata Ab
	Paalulaatta mitoitetaan samoilla perusteilla kuin sillat käyttäen rakentamismääräyskokoelmaa ja sitä täydentäviä lisäohjeita (mm. Betonirakenneohjeet TIEL 2172073-2000, Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnitteluohje TIEH 2100007-01, Siltojen kuormat jne.) Tavoitteena on 100 vuoden käyttöikä, jolloin betonilaatu ja -peite on valittu vastaavasti.	Matti Piispanen Tiehallinto
	Paalujen sijaintitoleranssia pienennettiin 0,2 metristä 0,1 metriin, jotta paalulaatan pienehköt jännemitat eivät kasva liikaa (3 m -> 3,4 m = 13 % !)	Matti Piispanen Tiehallinto
	Sienilaatta on erittäin herkkä rakenne, joka ei siedä tähän asti sallittuja paalujen sijaintipoikkeamia eikä ole ohutta laattaa käytettäessä mitoitettavissa niin, että yläpinnan halkeamat pysyvät teräsbetonirakenteiden määräysten sallimissa rajoissa. Taipumat kasvavat neljänteen potenssiin tasaisella kuormalla eli jännemitan kasvaminen 13 % lisää taipumaa 65 %.	Jorma Hartikainen Tampereen teknillinen yliopisto
	Kuinka varmistetaan paalujen liitos laattaan käytettäessä kolmen tai neljän paalun elementtilaattoja? Rakenteen kuivatus on vaarassa, mikäli laatan suunniteltu kaltevuus muuttuu paalun kantavuuden tai laatasta irti olevan paalun vuoksi.	Kari Hietala Tampereen kaupunki
Paalulaatan geotekninen mitoitus	Pohjatutkimuksia pitäisi olla riittävästi niin, että maakerrosrajat voitaisiin selkeästi erottaa ja tehdä selvä ero maalajiryhmien, esimerkiksi hienorakeisten ja eloperäisten välille.	Jorma Hartikainen Tampereen teknillinen yliopisto
	Infrarakentaminen on usein liitoksissa olemassa oleviin rakenteisiin. Tilanteet, joissa tie-, katu- tai ratapenger joudutaan alittamaan alikulkusiltaa käyttäen ovat yleisiä. Alikulun luiskiin muodostuu tällöin liukupintoja, joilla on tietty varmuus liukumista vastaan. Sillan päätyihin rakennettavat paalulaattarakenteet, jotka yleensä rakennetaan estämään sillan paaluihin kohdistuvia vaakakuormia tai pohjaveden laskusta aiheutuvaa sillan päätyjen painumista, pitäisi geoteknisesti mitoittaa alikulun luiskat huomioiden. Tällöin paalulaatan pituus määräytyisi alikulun luiskien riittävän varmuuden mukaan.	Kari Hietala Tampereen kaupunki
	Paalulaatan leveys tulisi mitoittaa siten, että penkereen luiskan stabiliteetti olisi maapohjan ominaisuudet huomioiden varmistettu.	Kari Hietala Tampereen kaupunki
	Paalulaatan leveys pitäisi mitoittaa siten, että pengerluiskan stabiliteetti olisi pohjamaan ominaisuudet huomioiden varmistettu. Tällöin pitäisi kuitenkin todella pehmeiden pohjamaiden alueilla paalulaatan reunan peittosyvyyden jäädessä vähäiseksi kiinnittää erityistä huomiota rakenteen routasuojaukseen. Tällaisissa tilanteissa voisi myös ajatella siirtymälaattojen käyttöä paalulaatan reuna-alueilla.	Markku Valtonen Geotesti Oy
	Pengerluiskan huono stabiliteetti taivuttaa myös pystypaaluja ja lisää penkereen käytönaikaisia korjauksia.	Jorma Hartikainen Tampereen teknillinen yliopisto
	Paalulaattarakennetta käytetään alueilla, joilla pohjamaan ominaisuudet eivät ole riittäviä paalulaatan valualustan vakavuus- ja painumakriteerien saavuttamiseen.	Markku Valtonen Geotesti Oy
	Paalulaatan valualustan painumien seurauksena raudoitukset voivat liikkua. Pahimmillaan jopa tartunnat ovat vaarassa, mikäli valualusta pääsee liaksi painumaan betonin painosta.	Jouko Suomalainen Oy VR-Rata Ab
	Pengeralustan painuma kuormittaa pystypaaluja ja taivuttaa vinopaaluja. Pengeralustan painuma voi olla enintään 0,2...0,5 metriä, jotta betonipaalujen rakenteellinen kestävyys on riittävä.	Jorma Hartikainen Tampereen teknillinen yliopisto
	Käytettäessä paalulaattarakennetta alueilla, joilla pohjamaan ominaisuudet eivät ole riittäviä paalulaatan valualustan vakavuus- ja painumakriteerin saavuttamiseen, voitaisiin paalulaatan valu suorittaa esimerkiksi paalujen varaan asennettujen teräsprofiilien avulla. Tällöin paalulaatta voisi toimia yhdessä teräsprofiilien kanssa liittorakenteena.	Markku Valtonen Geotesti Oy
	Paalulaattarakenne routamitoitetaan paalulaatan poikkileikkaukseen nähden pystysuoran routasyvyyden mukaan. Jos paalulaatta sijaitsee luonnolliseen maapohjaan nähden korkealla pitäisi paalulaatan routamitoituksessa huomioida myös routasyvyys luiskasta kohtisuoraan.	Kari Hietala Tampereen kaupunki



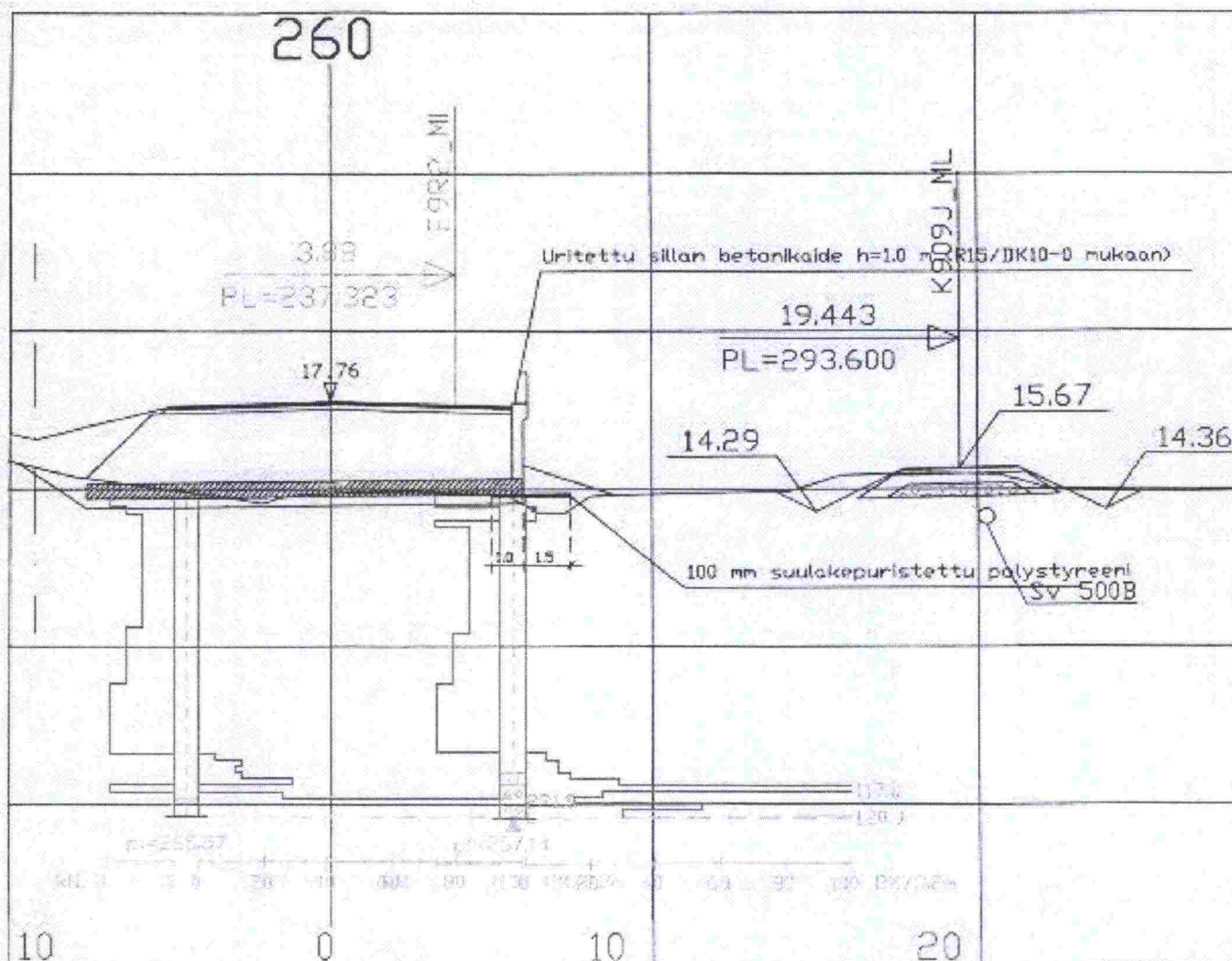
Paalulaattarakenteiden suunnittelu  
LIITE 1

Paalujen rakenne-suunnittelu	Paalut on aina oletettava käyristyneiksi. Käyristymiseen vaikuttavat sallitut sijaintipoikkeamat, pohja-suhteet ja asennustapa sekä erityisesti rakenteen käyttöaikana tehtävät muutokset. Kun paalun käyristymistä ei voida tarkasti ennakoida tai mitata, betonipaaluille sallitaan sellainen paalun suuntainen kuormitus, että paalun taivutuskestävyys on suurimmillaan.	Jorma Hartikainen Tampereen teknillinen yliopisto
	Paalujen ei tarvitse olla siltapaaluja, tavanomaiset teräsbetonipaalut ja teräspaalut ovat mahdollisia.	Matti Piispanen Tiehallinto
	Paalujen nurjahdusmitoitus tulee useimmin vastaan juuri paalulaatoissa, kun niitä tehdään erittäin huonosti kantaville paikoille.	Matti Piispanen Tiehallinto
	Useissa tapauksissa paalulaatan ulkopuolista luiska-aluetta on käytetty suunnitelmista poiketen ylijää-mämassojen läjitysalueena. Lisämassat aiheuttavat paalulaatan reunapaaluille lisäkuormia. Luiska-täytön painuminen ja työntyminen laatan reunan alta aiheuttaa paalulaatan reunimmaisille paaluille liian suurta taivutusta.	Markku Valtonen Geotesti Oy
	Vanhojen täyttöalueiden esirakentaminen voi paalutuksen sekä alueellisen stabiliteetin kannalta olla hyvinkin haastavaa. Paksujen louhe, kivi tai lohkarie täyttöjen läpäisy on perinteisellä teräs-betonipaalulla mahdotonta, mutta erittäin vaativaa myös "erikoispaaluja" käytettäessä. Lisäksi alueellisen stabiliteetin puute ja mahdolliset täyttömaiden sivusiirtymät aiheuttavat paaluille erit-täin suurta taivutusta.	Osmo Korhonen Helsingin kaupunki
Siirtymära-kenteet ja liittyminen muihin ra-kenteisiin	Siirtymälaattaa suositellaan käytettäväksi myös laatan reunoilla pohjasuhteista riippuen. Käyttöä ei suunnitteluohjeissa ole vaadittu, eikä siirtymälaatoista ole esitetty tyyppirakenteita.	Pentti Salo Tiehallinto
	Siirtymälaattojen merkitystä pitäisi paalulaattojen päätyihin muodostuvien painumaerojen vähentä-miseksi korostaa.	Kari Hietala Tampereen kaupunki
	Tien pituussuuntaisissa siirtymärakenteissa ainut varma, pituuskaltevuuden muodonmuutoskriteerit täyttävä ratkaisu on jatkaa paalulaattarakennetta niin, että se mahdollistaa siirtymisen paalulaatalta kovalle pohjalle tai massanvaihdolle.	Markku Valtonen Geotesti Oy
	Joskus sillan antura on liitetty paalulaattaan, mutta tavanomainen ratkaisu on pitää kumpikin erillään.	Matti Piispanen Tiehallinto
	Kaduilla on nähtävissä erilaisten perustusmenetelmien aiheuttamaa painumaeroa. Käytännössä tämä ilmenee tien pituussuuntaisena kumpuiluna.	Osmo Korhonen Helsingin kaupunki
	Tiivissä kaupunki rakentamisessa viereisten rakenteiden erilaiset perustamismenetytmet voivat aiheuttaa ongelmia. Painumien erisuuruudesta johtuen mm. talojen perustusten alle voi muodos-tua "pieneläimen mentävä" aukko. Lisäksi siirtymärakenteiden puutteellisuus voi paaluilla pe-rustetun kadun, piha-alueen tai jalkakäytävän reunoilla johtaa päällysteiden liialliseen huoltotar-peeseen.	Osmo Korhonen Helsingin kaupunki
Rakenteiden korjaus ja huolto	Siirtymärakenteissa on vielä paljon kehittämistä, että ne täyttävät raskaan ja/tai nopean liikenteen asettamat vaatimukset.	Jorma Hartikainen Tampereen teknillinen yliopisto
	Paalulaattojen sijainteja ei löydy tierekistereistä lukuun ottamatta joitakin siltoihin liittyviä paalulaat-toja. Tämä koituu ongelmaksi huollon, lisärakentamisen ja rakenteiden korjaamisen kannalta.	Petter Sandin Uudenmaan tiepiiri
	Ratojen perustusten korjaaminen on hankalaa ellei mahdotonta raideliikenteen asettamien vaati-musten vuoksi. Raidekatko voi maksaa radan käyttäjille ajanmenetyksinä suhteettoman paljon itse rakentamiskustannuksiin verrattuna.	Jouko Suomalainen Oy VR-Rata Ab
	Vanhojen rakenteiden korjaaminen tai korvaaminen paalulaattarakenteella on mahdollista nykyisin käytännössä vain elementtilaattoja käyttäen. Näistä on esitetty tyyppiratkaisu julkaisussa: Pen-gerlaatat, 1992.	Jouko Suomalainen Oy VR-Rata Ab
	Paalulaattarakenteiden korjaaminen liikenteen alaisilla väylillä on teknisesti erittäin vaikeaa ja talou-dellisesti kalliimpaa kuin uuden rakentaminen.	Jorma Hartikainen Tampereen teknillinen yliopisto
Muut mieli-piteet	Paalulaattarakenteiden vaurioituminen ei näy ennen kuin rakenne on vaurioitunut käyttökelvottomaksi.	Jorma Hartikainen Tampereen teknillinen yliopisto
	Diplomityössä tulisi painottaa paalulaatan rakennesuunnittelua.	Pentti Salo Tiehallinto

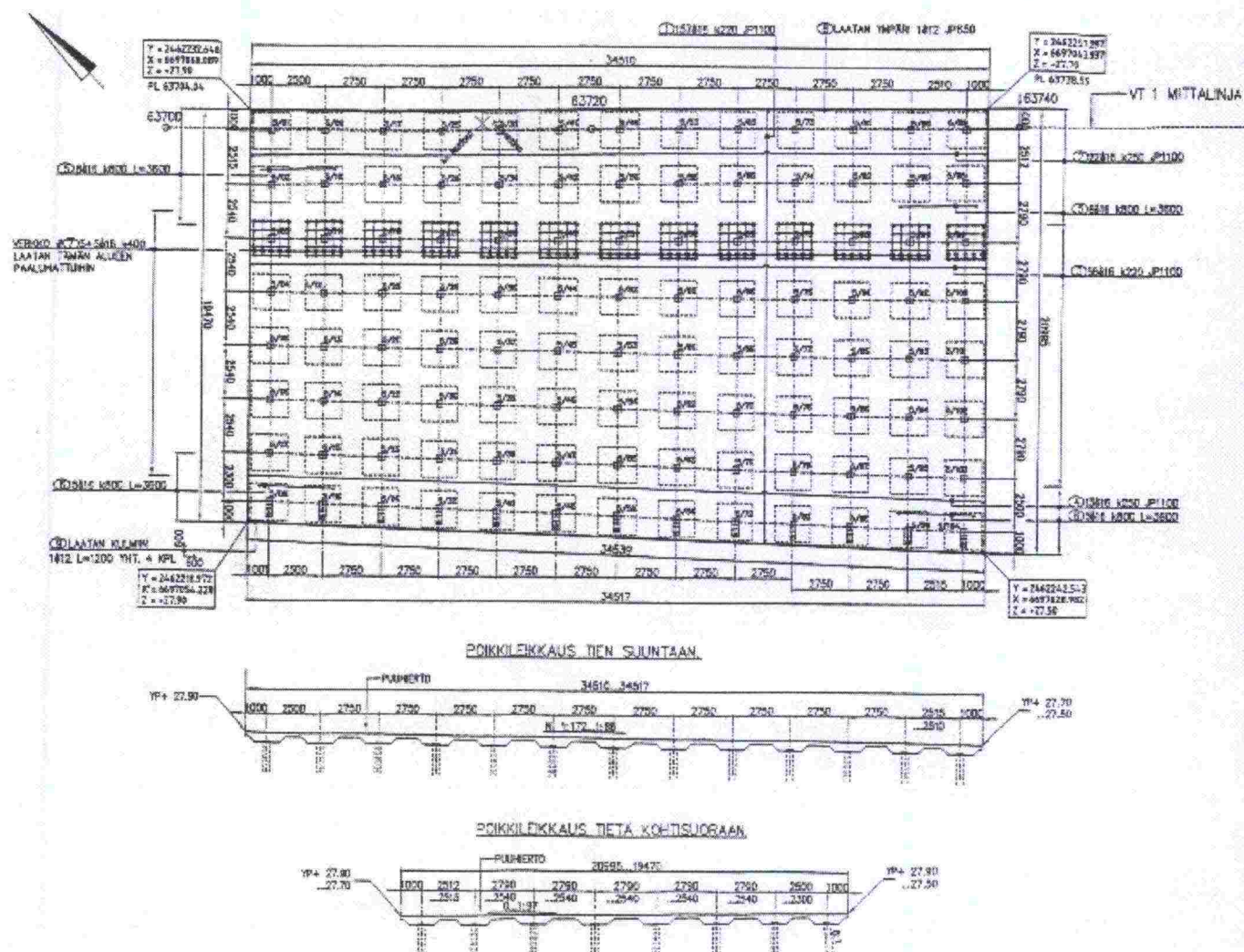
Diplomityö painottaa rakennesuunnittelua. Oleellista on kuitenkin huomioida myös rakennustyön suunnittelu eli itse rakentamiseen liittyvät näkökohdat.	Jouko Suomalainen Oy VR-Rata Ab
Suunnittelijoiden pitäisi selkeästi erottaa uudisrakentaminen korjausrakentamisesta. Rakentamisen liittyessä jo olemassa olevaan rakenteeseen pitää suunnittelijan nähdä ns. "suuri kuva". Kokonaisuuden hahmottamista pitäisi korostaa geoteknisten näkökohtien kuten stabiiliteetin osalta.	Kari Hietala Tampereen kaupunki



## LIITE 2

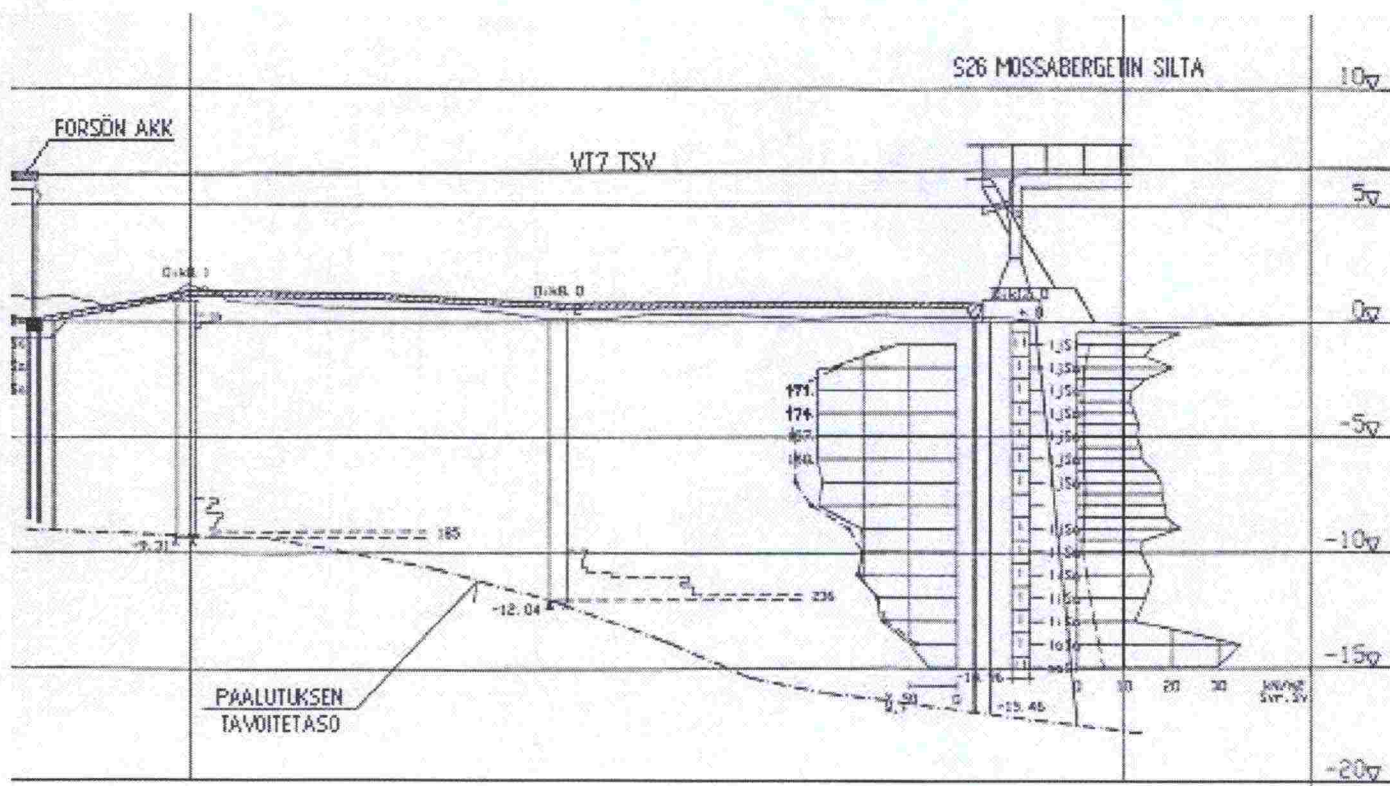


Kuva 1. Kehä III (Kt 50) parantaminen välillä Lentoasemantien – Tikkurila, Suutarilan eritasoliittymän paalulaatta 6, poikkileikkaus paalulta 260.



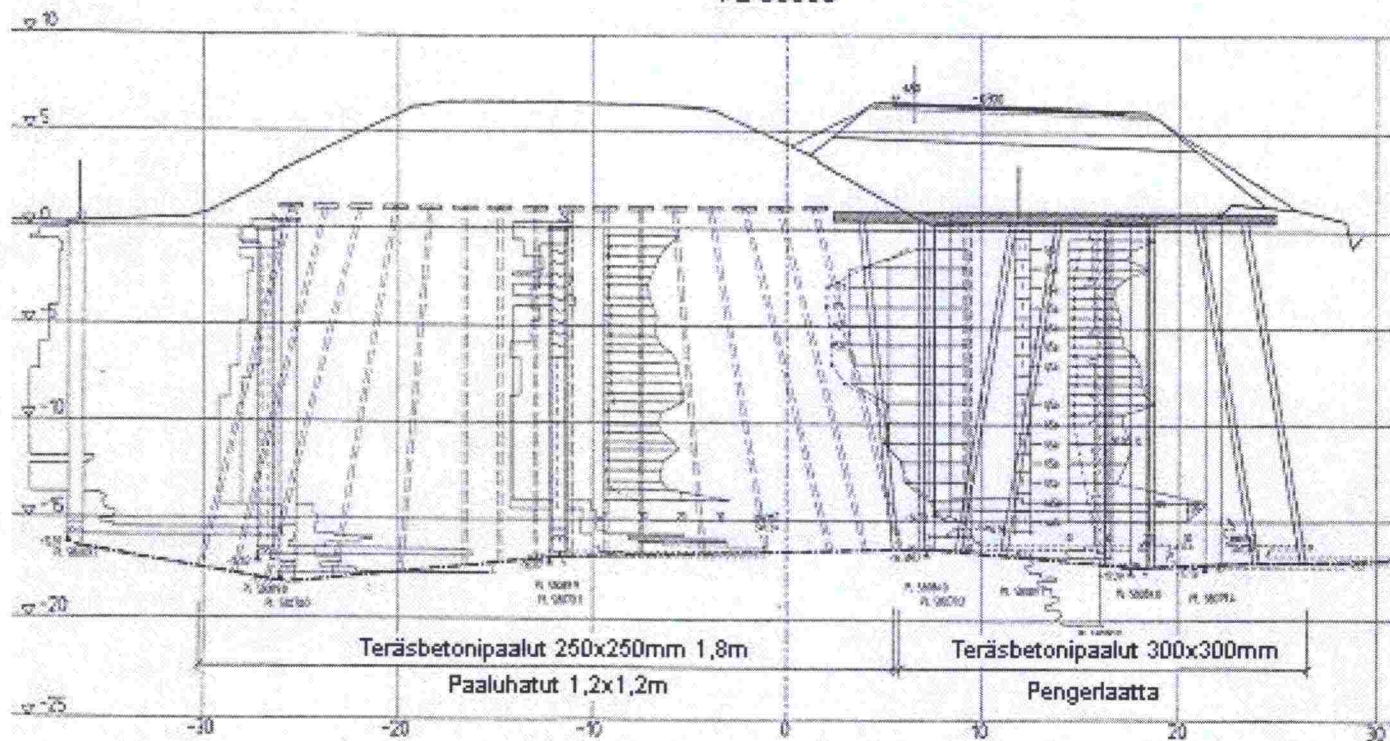
Kuva 2. E18 Paimio – Muurla paalulaatan numero 5 tasokuva.



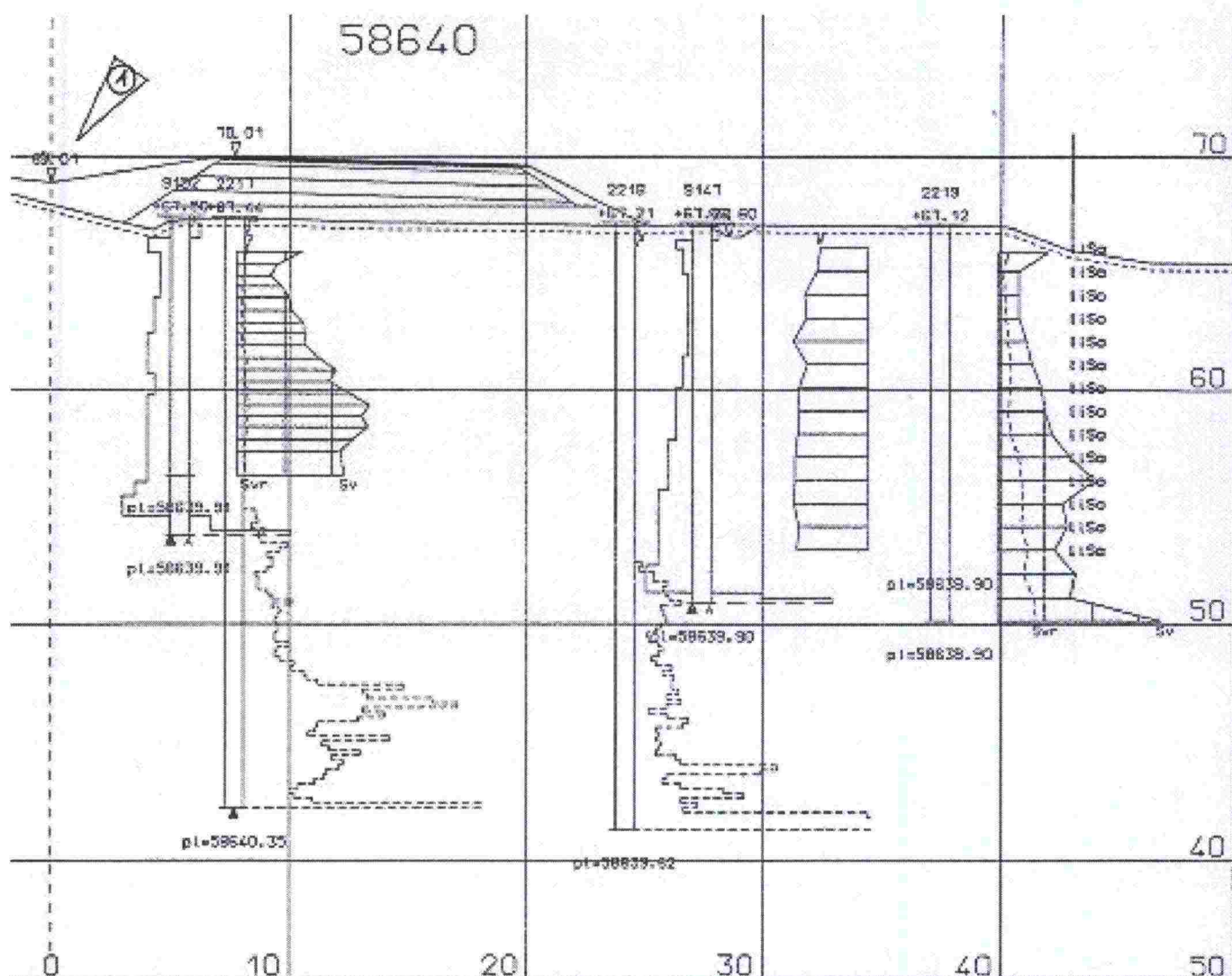


Kuva 3. Valtatie 7 (E18) parantaminen moottoritieksi välillä Porvoo – Koskenkylä, paalulaatan numero 11 pituusleikkaus.

PL 58080

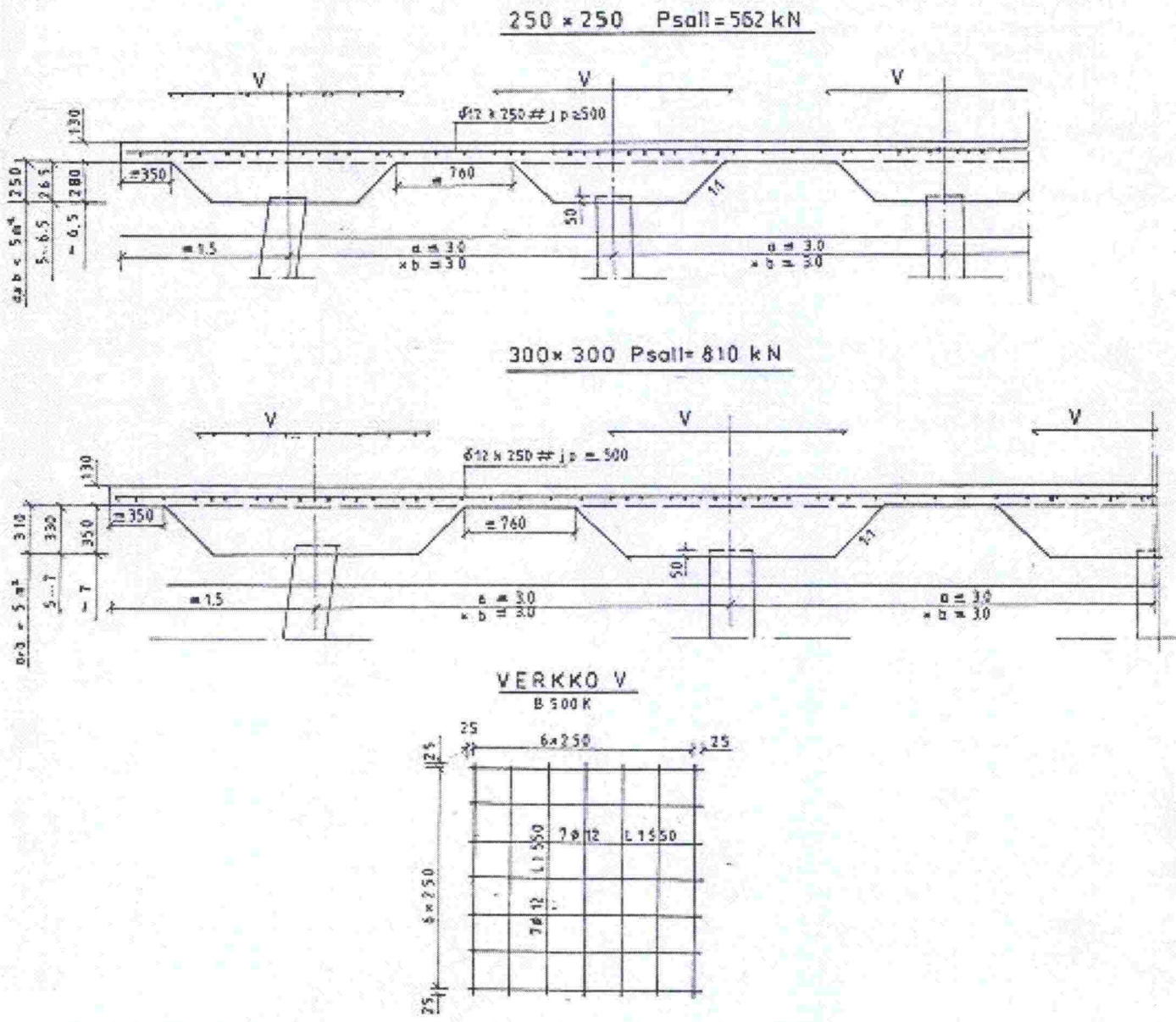


Kuva 4. Valtatie 7 (E18) parantaminen moottoritieksi välillä Porvoo – Koskenkylä, poikkileikkaus paalulta 58080.

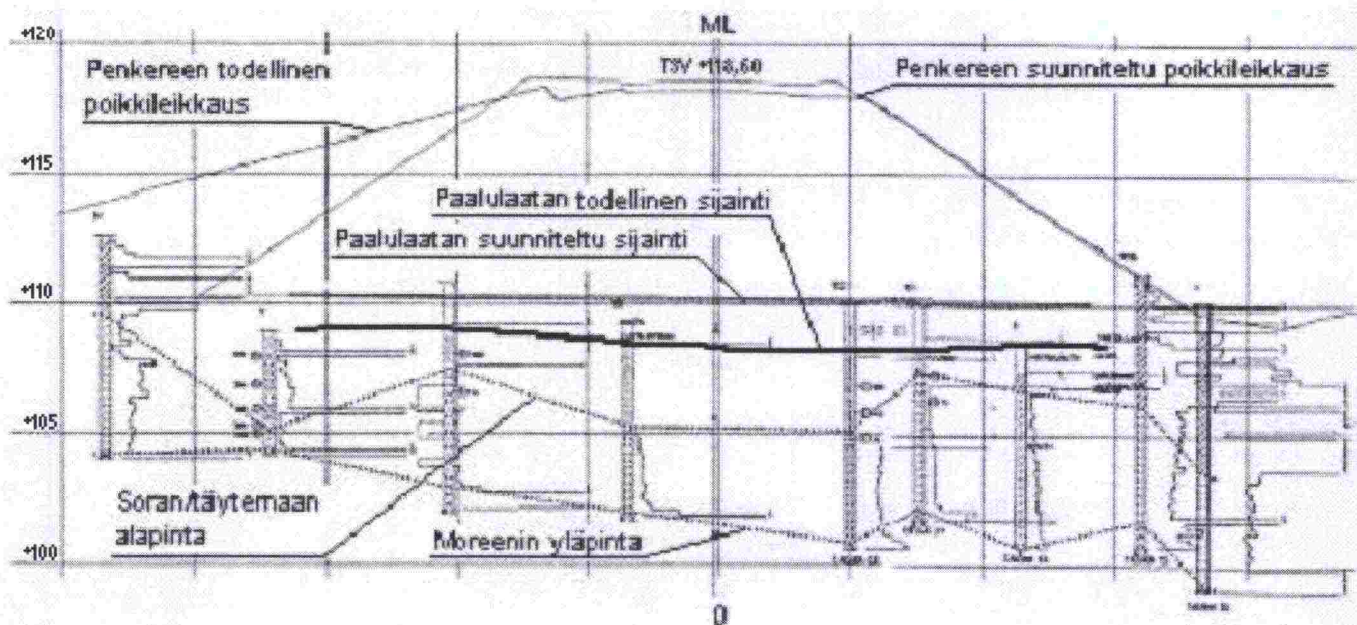


Kuva 5. Vt4 (E75) parantaminen moottoritieksi välillä Järvenpää – Lahti, poikkileikkaus paalulta 58640.





Kuva 6. Vt4 (E75) parantaminen moottoritieksi välillä Järvenpää – Lahti, rakenne.



Kuva 7. Multisilta, paalulaatan romahtamisen jälkeinen tilanne.



ISSN 1457-9871  
ISBN 951-803-509-1  
TIEH 3200937